

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

AUTOMATICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍCH STROJŮ

AUTOMATIC DESIGN OF SYNCHRONOUS MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Fiala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Fiala

ID: 203218

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Automatický návrh synchronních strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte způsob návrhu synchronních strojů.
2. V programu MATLAB napište program pro návrh synchronního stroje s vinutým rotorem.
3. V programu MATLAB napište program pro návrh synchronního stroje s permanentními magnety na rotoru.
4. Proveďte diskuzi dosažených výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ, 2014. Design of rotating electrical machines. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley. ISBN 9781118581575.
- [2] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK, 1968. Teorie elektrických strojů. Praha: SNTL. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič, 1988. Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL. Nakladatelství technické literatury.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 29.5.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu synchronních strojů. První část práce je věnována popisu funkce a konstrukce synchronního stroje. V další části je popsán postup návrhu synchronních motorů s budicím vinutím a s permanentními magnety. Na základě popsaného způsobu byl následně vytvořen program k automatizovanému návrhu těchto typů synchronních motorů v programovacím prostředí Matlab. V závěru práce jsou popsány výsledky, kterých bylo v rámci práce dosaženo.

KLÍČOVÁ SLOVA

Synchronní stroj; návrh; synchronní stroj s budicím vinutím; PMSM

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with problematic of design of synchronous machines. First part is dedicated to descript function and structure of a synchronous machine. The next part describes an algorithm of design of wound rotor and permanent magnets synchronous machines. Based on the described method, the program for automated design of these types of synchronous machines was created in the programming environment Matlab. At the end of the thesis, there are described the results that were achieved within the work.

KEYWORDS

Synchronous machine; design; wound rotor synchronnous machine; PMSM

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Automatizovaný návrh synchronních strojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Radoslavu Cipínovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

1	Úvod	10
2	Synchronní motor	11
2.1	Princip funkce	11
2.2	Konstrukce	12
3	Návrh synchronních strojů	13
3.1	Zadání návrhu	13
3.2	Návrh statoru	14
3.2.1	Návrh drážek a vinutí statoru	17
3.2.2	Parametry statorového vinutí	19
3.3	Návrh motoru s budicím vinutím	20
3.3.1	Rozměry vzduchové mezery	20
3.3.2	Návrh pólů a jha rotoru	21
3.3.3	Výpočet tlumicího vinutí	23
3.3.4	Výpočet magnetického obvodu	24
3.3.5	Odpory a reaktance statorového vinutí	27
3.3.6	Budicí vinutí	30
3.3.7	Impedance rotorových vinutí	33
3.4	Návrh PMSM	34
3.4.1	Návrh magnetů	34
3.4.2	Výpočet zbývajících rozměrů rotoru	36
3.4.3	Výpočet odporů a reaktancí PMSM	37
3.5	Výpočet technických ukazatelů stroje	38
3.5.1	Hmotnost aktivních částí stroje	38
3.5.2	Ztráty a účinnost motoru	39
3.5.3	Úhlová charakteristika	40
3.6	Porovnání motorů	41
4	Vytvořený program	43
4.1	Popis funkce programu	43
4.2	Porovnání funkce programu	46
	Závěr	48
	Literatura	49
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	50

Seznam příloh	55
A Použité grafy	56
B Použité tabulky	62
C Porovnání s 1,6 MW motorem	64

Seznam obrázků

2.1	Dvoupólový synchronní stroj	11
3.1	Rozměry aktivního železa statoru [7]	16
3.2	Drážka statoru	19
3.3	Charakteristika naprázdno	28
3.4	Dílčí magnetizační charakteristiky	28
3.5	Fázorový diagram	30
3.6	Závislost $u_i = f(U_{\delta zj1}/U_\delta)$ [7]	31
3.7	Budicí vinutí s polokruhovým čelem [7]	33
3.8	Hysterezní smyčka permanentního magnetu [12]	37
3.9	Úhlové charakteristiky navržených motorů	41
4.1	Uživatelské rozhraní vytvořeného programu	43
4.2	Okno programu pro návrh motoru s budicím vinutím	44
4.3	Zobrazení parametrů statoru navrženého motoru v programu	44
4.4	Zobrazení parametrů rotoru navrženého motoru v programu	45
4.5	Zobrazení parametrů statorového vinutí navrženého motoru v programu	45
4.6	Zobrazení parametrů rotorových vinutí motoru s budicím vinutím	45
4.7	Zobrazení úhlové charakteristiky navrženého motoru v programu	46
4.8	Návrh 1,6 MW motoru pomocí programu	47
A.1	Závislost $D_s = f(P_i)$ pro různé počty pólů [7]	56
A.2	Závislost A na pólové rozteči τ_p [7]	56
A.3	Závislost B_δ na pólové rozteči τ_p [7]	57
A.4	Rozmezí drážkové rozteče statoru v závislosti na pólové rozteči [7]	57
A.5	Závislost $A\sigma_s$ na pólové rozteči τ_p [7]	58
A.6	Závislost x_d na momentové přetížitelnosti m_{\max} [7]	58
A.7	Závislost α_δ a k_B na pólovém krytí α [7]	59
A.8	Závislost činitele c na magnetické indukci [11]	59
A.9	Závislost λ'_h na $b_0/\delta' k_c$ [7]	60
A.10	Závislost činitelů k_{ad} a k_{aq} na pólovém krytí α [7]	60
A.11	Závislost koeficientů κ_d , κ_q a k na $U_{\delta zj1}/U_\delta$ [7]	61
A.12	Koeficienty C_d a C_q [7]	61

Seznam tabulek

3.1	Zadané hodnoty pro návrh motoru	13
3.2	Hodnoty účinnosti η motorů při napětí 6000 V[7]	14
3.3	Hodnoty činitele K_D [7]	15
3.4	Řada vnějších průměrů statoru[7]	15
3.5	Výška pólových nastavců[7]	21
3.6	Činitel k v závislosti na výšce pólových nastavců[7]	22
3.7	Normální charakteristika naprázdno[7]	27
3.8	Rozměr δ'' [7]	32
3.9	Porovnání hmotností navržených motorů	39
3.10	Porovnání obou typů motorů	42
B.1	Rozměry a průřezy měděných vodičů pravoúhlého průřezu	62
B.2	Rozměry a průřezy měděných plochých tyčí se zaoblenými hranami	62
B.3	Magnetizační charakteristiky použitých plechů při frekvenci 50 Hz. (Převzato z: https://cogent-power.com/)	63
C.1	Dodané parametry 1,6 MW motoru	64
C.2	Parametry motoru navrženého programem	65

1 Úvod

Synchronní stroje jsou jednou ze skupin v oblasti elektrických strojů. Je možné je dělit na klasické synchronní stroje, krokové motory a reluktanční motory. Tato práce se zabývá výhradně klasickými synchronními stroji, konkrétně stroji s budícím vinutím a s permanentními magnety.

Synchronní stroje s budícím vinutím se nejčastěji používají jako alternátory, které tvoří velkou část výroby elektrické energie. Synchronní motory s budícím vinutím se vzhledem ke svým vlastnostem používají zejména pro větší pohony v průmyslu, které nevyžadují regulaci otáček a časté spouštění či zastavování. Synchronní motory jsou jediný typ motorů, který dokáže dodávat do sítě jalový proud, čímž jsou odlehčeny alternátory. V rozvodu elektrické energie se také používají synchronní kompenzátory, které svým chodem dokáží podle potřeby dodávat či odebírat jalový proud.[1]

Výhodou motorů s permanentními magnety je vysoká účinnost a malá velikost v porovnání s asynchronními motory. Jejich hlavní výhodou vůči motorům s budícím vinutím je absence napájení rotoru, kde pak nevznikají ztráty ve vinutí, a také nepřítomnost kartáčů, které vyžadují častou údržbu. Synchronní motory s permanentními magnety se dnes používají jako trakční motory pro vozidla, kde nahrazují asynchronní a stejnosměrné motory. Dále se používají jako pomocné pohony v automobilové technice, kde postupně nahrazují stejnosměrné stroje s permanentními magnety.[2] [3]

Návrh stroje je snaha určit rozměry stroje, typy vinutí, materiály, vodiče, izolace, a podobně tak, aby bylo dosaženo co nejlepších energetických ukazatelů a zároveň byly dodrženy požadavky na jeho použití. Návrh obvykle začíná stanovením hlavních rozměrů stroje a provedením elektromagnetického návrhu, který končí stanovením technických ukazatelů a charakteristik stroje. Následuje konstrukční návrh a poté jsou provedeny tepelné, mechanické a ventilační výpočty či simulace, kontrolující funkci daného stroje. Tato práce se zabývá pouze prvními dvěma body návrhu, tedy volbou hlavních rozměrů stroje a elektromagnetickým návrhem.[7]

První část této práce se zabývá popisem základních principů funkce a základní konstrukcí synchronních strojů. Dále je uveden postup elektromagnetického návrhu synchronního motoru s budícím vinutím a motoru s permanentními magnety. Postup návrhu je popsán na příkladu návrhu konkrétního stroje. Práce dále obsahuje popis funkce programu na automatický návrh synchronních motorů. Ve vytvořeném programu byl pak proveden návrh motoru s permanentními magnety se zadanými parametry a výsledky byly porovnány s výpočtovým listem existujícího motoru.

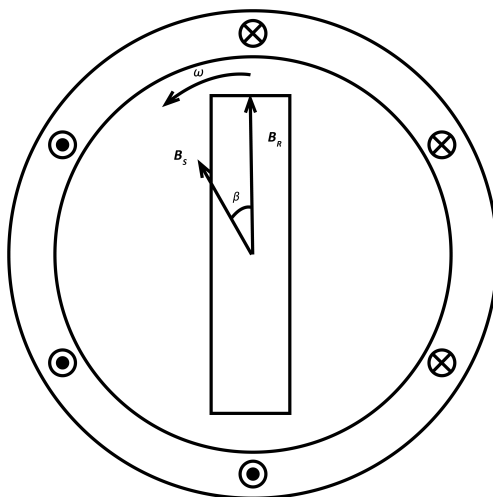
2 Synchronní motor

Synchronní stroj je střídavý točivý stroj s otáčkami v ustáleném stavu přímo úměrnými frekvenci proudu, který protéká kotvou stroje, obvykle statorovým vinutím.

Otáčky motoru jsou tedy konstantní, nezávislé na zatížení. Jediným způsobem změny rychlosti je změna napájecí frekvence, případně změna počtu pólů. Na rozdíl od asynchronních strojů jsou synchronní motory schopné fungovat s různými účinnými, indukčními i kapacitními. Proto je možné je použít i pro kompenzační účely.[4]

2.1 Princip funkce

Vinutí statoru synchronního motoru je napájeno střídavým proudem, který vytváří točivé magnetické pole, reprezentované magnetickou indukcí \mathbf{B}_s . V rotoru je buzením vytvářeno stacionární magnetické pole, reprezentované magnetickou indukcí \mathbf{B}_r , které se snaží dosáhnout pole statoru, a tím otáčí rotorem. Rotor se tedy otáčí zároveň s magnetickým polem statoru úhlovou rychlostí ω . [5]



Obr. 2.1: Dvoupólový synchronní stroj

Otáčky motoru závisí na počtu pólových dvojic podle vztahu:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (2.1)$$

kde f je frekvence napájecího napětí, n jsou otáčky motoru a p je počet pólových dvojic.

Při provozu bez zatížení sleduje magnetické pole rotoru přesně pole statoru. Při zvyšování zátěžného momentu se rotor zpožďuje za polem statoru o zátěžný úhel β . Se zvyšujícím se zatížením pak zátěžný úhel roste.

Moment synchronního motoru je přímo úměrný sinu zátěžného úhlu, maximální moment tedy nastává při zátěžném úhlu $\beta = \frac{\pi}{2}$. Při překročení maximálního momentu dochází k zastavení motoru a motor přechází do chodu nakrátko.[6]

Maximální moment je dán momentovou přetížitelností motoru, tedy poměrem maximálního a jmenovitého momentu motoru:

$$m_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_N} \quad (2.2)$$

Hodnota momentové přetížitelnosti závisí zejména na velikosti vzduchové mezery.[7]

2.2 Konstrukce

Synchronní motor se skládá z nepohyblivé části, statoru, a pohyblivé části, rotoru, mezi nimi je vzduchová mezera.

Stator synchronního motoru je protékán střídavým proudem, je tedy vždy složen z plechů s drážkami, ve kterých je uloženo obvykle třífázové vinutí spojené do hvězdy. Rotor nemusí být složen z plechů, protože v něm nevznikají ztráty v železe, často je tvořen kovaným rotorovým válcem, na kterém je umístěno buzení.[8]

Podle buzení můžeme synchronní motory dělit na motory s budicím vinutím a motory s permanentními magnety (PMSM, z angl. Permanent Magnet Synchronous Machine). V případě strojů s budicím vinutím pak může být budič umístěn na hřídeli společně s rotorem nebo může být budicí proud přiveden do vinutí přes kroužky.[6][8]

Stroje s budicím vinutím se podle konstrukce rotoru dělí na stroje s vyniklými póly a stroje s hladkým rotorem. Dvou- a čtyřpólové motory se obvykle vyrábějí jako stroje s hladkým rotorem, u vícepólových motorů se spíše používá rotoru s vyniklými póly. V rotoru často bývá uloženo také tlumicí vinutí, které je nezbytné k asynchronnímu spuštění motoru a k tlumení kývání rotoru. Toto vinutí je tvořeno klecí nakrátko. Jiným způsobem spuštění motoru je postupná změna frekvence napájecího napětí nebo roztočení vnější silou.[5]

U motorů s permanentními magnety se rozlišují rotory s permanentními magnety (PM) na povrchu rotoru a rotory se zapaštěnými magnety. U tohoto typu motoru se obvykle používá frekvenční rozběh a PMSM neobsahují tlumicí vinutí. Vzhledem k využití permanentních magnetů k tvorbě magnetického pole rotoru odpadá nutnost napájení rotoru, nejsou zde tedy obsaženy kroužky.

3 Návrh synchronních strojů

Pokud není uvedeno jinak, vychází návrh z literatury [7] a [11].

Jedná se postup návrhu synchronního stroje s budičím vinutím a vyniklými póly a návrhu synchronního stroje s permanentními magnety.

3.1 Zadání návrhu

Výchozí hodnoty pro návrh stroje jsou:

1. Jmenovitý výkon motoru P_N v kilowattech (kW).
2. Počet fází m a typ spojení statorového vinutí. Uvedený postup návrhu počítá se třemi fázemi a zapojením do hvězdy.
3. Jmenovité otáčky motoru n v otáčkách za minutu (min^{-1}).
4. Jmenovitá frekvence napájecího napětí f v hertzech (Hz). Uvedený postup návrhu počítá se síťovou frekvencí 50 Hz.
5. Jmenovité napětí statoru U_N ve voltech (V).
6. Jmenovitý účinník motoru $\cos \varphi$.
7. Momentová přetížitelnost motoru m_{\max} . Hodnota bývá obvykle mezi 1,7 a 2,5.
8. Činitel plnění železa k_{Fe} , závisí na tloušťce plechů a použitých technologických postupech. Většinou bývá mezi 0,95 a 0,97.
9. Typ použitých plechů. Používají se plechy pro elektrotechniku (značené M).
10. U PMSM stroje je nutné určit také typ a jakost použitých magnetů. Obvykle se používají NdFeB magnety či magnety SmCo.

Uvedený příklad návrhu vychází ze zadaných hodnot uvedených v Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Zadané hodnoty pro návrh motoru

Jmenovitý výkon P_N	500 kW
Jmenovité otáčky n	500 min^{-1}
Jmenovitá frekvence f	50 Hz
Jmenovité napětí U_N	6000 V
Jmenovitý účinník $\cos \varphi$	0,9
Momentová přetížitelnost m_{\max}	2,2
Činitel plnění železa k_{Fe}	0,95
Typ použitých plechů	M400-50A
Typ PM	NdFeB 40SH

3.2 Návrh statoru

Pro oba typy navrhovaných strojů lze použít stejný postup výpočtu hlavních rozměrů stroje a návrhu statoru, další postup se potom liší.

Hlavními rozměry stroje jsou myšleny vnitřní a vnější průměr statoru D_s a D_o a ideální délka l_i . Rozměry se určují na základě zkušeností z návrhu podobných strojů. Pro určení průměru D_s se využívá závislost průměru na vnitřním elektromagnetickém výkonu stroje – $D_s = f(P_i)$ podle počtu pólů viz Obr. A.1 (v logaritmickém měřítku).

Počet pólových dvojic navrhovaného motoru je možné spočítat z otáček motoru a jmenovité frekvence podle (2.1):

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = 6$$

Počet pólů navrhovaného motoru je tedy $2p = 12$.

Vnitřní elektromagnetický výkon stroje lze určit podle vztahu:

$$P_i = \frac{k_E \cdot P_N}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (3.1)$$

kde k_E je poměr elektromotorického napětí indukovaného v kotvě k napětí jmenovitému. U synchronních motorů je možné volit $k_E \approx 1,05$ – $1,06$.

Účinnost η je možné předběžně zvolit podle Tab. 3.2 pro daný výkon a otáčky při napětí 6 000 V. Pro napětí 400 V se účinnost motoru zvyšuje o 0,3–1 %, pro napětí 10 000 V se snižuje o 0,05–0,2 %.

Tab. 3.2: Hodnoty účinnosti η motorů při napětí 6000 V [7]

P_N [kW]	n_N [min ⁻¹]							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	-	94,2	93,9	93,4	-	91,25	91,27	90,8
400	-	94,6	94,0	93,9	92,9	91,6	91,96	92,0
500	-	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93,0	93,0
630	95,0	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,4	95,0	95,0	94,4	94,45
1250	-	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	-	96,3	96,0	96,0	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	-	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	-	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	-	97,0	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96,0
4000	-	97,2	97,0	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	-	97,3	97,2	97,09	97,07	-	-	-

Pro příklad návrhu byl zvolen $k_E = 1,05$ a účinnost $\eta = 93,7\%$. Vnitřní elektromagnetický výkon motoru je tedy:

$$P_i = 622,55 \text{ kW}$$

Vnitřní průměr statoru odpovídající vypočtenému elektromagnetickému výkonu P_i podle Obr. A.1:

$$D_s = f(P_i) = 0,89 \text{ m}$$

Hodnotu vnějšího průměru statoru D_o jde určit z hodnoty vnitřního průměru statoru vynásobením činitelem K_D , který závisí na počtu pólů podle Tabulky 3.3.

Tab. 3.3: Hodnoty činitele K_D [7]

$2p$	4	6	8	10	12	16
K_D	1,43–1,52	1,4–1,45	1,35–1,4	1,3–1,35	1,28–1,33	1,22–1,28

Z takto získané hodnoty činitele $K_D = (1,28–1,33)$ vypočteme rozsah možných vnějších průměrů statoru:

$$D_o = K_D \cdot D_s = (1,139–1,184) \text{ m} \quad (3.2)$$

Z vypočteného rozsahu je vybrána hodnota vnějšího průměru statoru D_o z řady statorových průměrů podle Tabulky 3.4. Pokud se v rozsahu žádná z hodnot nenachází, je nutné vybrat nejbližší hodnotu vnějšího průměru statoru a poté přepočíst vnitřní průměr statoru podle vzorce:

$$D_s = \frac{D_o}{K_D} \quad (3.3)$$

Tab. 3.4: Řada vnějších průměrů statoru[7]

D_o [m]	0,28	0,327	0,393	0,423	0,493	0,52	0,59	0,66	0,74
D_o [m]	0,85	0,99	1,18	1,43	1,73	2,15	2,6	3,25	-

Byla tedy vybrána hodnota $D_o = 1,18 \text{ m}$. Hodnota vnějšího průměru statoru se nachází ve vypočteném rozsahu, není nutné přepočítávat vnitřní průměr statoru.

Z určeného vnitřního průměru statoru je možné spočíst pólovou rozteč:

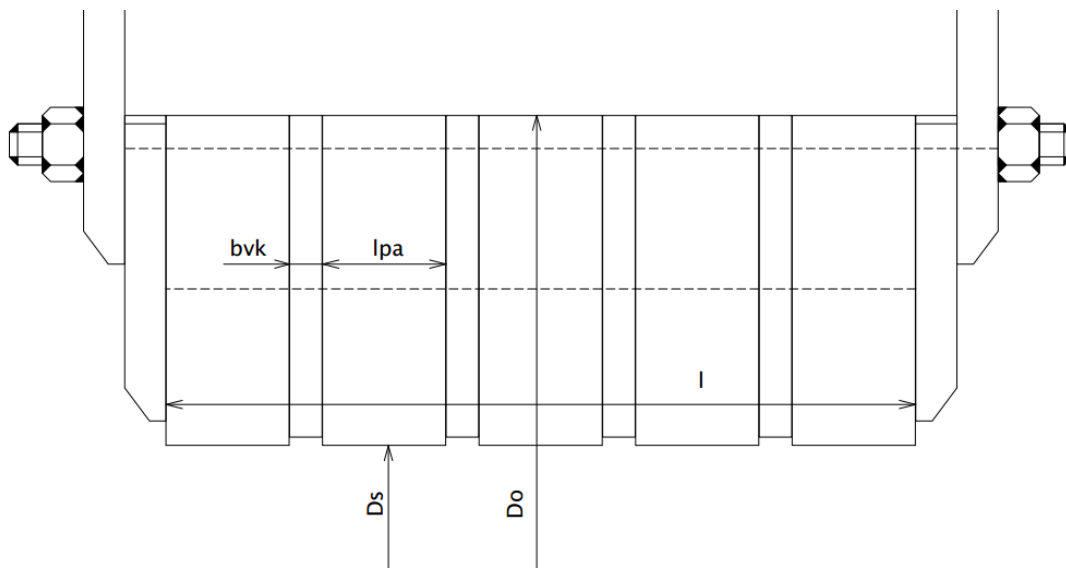
$$\tau_p = \frac{\pi D_s}{2p} = 0,233 \text{ m} \quad (3.4)$$

Dále je možné určit ideální délku statoru l_i :

$$l_i = \frac{6,1 P_i}{\alpha_\delta k_B k_{vs} A B_\delta D_s^2 n} = 0,3546 \text{ m} = 353,6 \text{ mm}, \quad (3.5)$$

kde činitelé α_δ a k_B závisí na parametrech pólového nástavce, které zatím nejsou známy. Hodnotu jejich součinu můžeme zvolit předběžně $\alpha_\delta k_B \approx 0,75\text{--}0,78$. V příkladu je použita hodnota $\alpha_\delta k_B \approx 0,76$ a činitel vinutí k_{vs} je předběžně roven 0,92.

Hodnoty lineární hustoty proudu A a indukce ve vzduchové mezeře B_δ lze určit podle Obr. A.2 a Obr. A.3 v závislosti na vypočtené pólové rozteči motoru a počtu pólů. Závislosti lze použít pro stroje s napájecím napětím 400 nebo 6 000 V, pro jmenovité napětí 10 000 V je vhodné zjištěnou lineární hustotu proudu snížit o 10–15 %. Všechny tyto hodnoty jsou pouze předběžné, v průběhu výpočtu se mohou měnit.



Obr. 3.1: Rozměry aktivního železa statoru[7]

U strojů s délkou statoru větší než 200 mm se pro zlepšení chlazení dělí stator na několik paketů, mezi kterými jsou ventilační kanálky. Délka jednotlivých paketů l_{pa} se volí 40 až 50 mm, šířka ventilačního kanálu je obvykle $b_{vk} = 10$ mm.

Pokud se ve statoru nachází ventilační kanálky, je celková délka statoru přibližně $l = (1,05 \text{ až } 1,08)l_i$:

$$l = 1,05l_i = 373,3 \text{ mm}$$

Počet ventilačních kanálků je možné určit jako celé číslo z rozsahu:

$$n_{vk} = \frac{l - l_{pa}}{l_{pa} + b_{vk}} = 5,38 \text{ až } 6,66 \quad (3.6)$$

Počet ventilačních kanálků tedy je $n_{vk} = 6$.

Poté lze upřesnit délku paketu a určit celkovou délku paketů motoru (vyjádřením z rovnice (3.6)):

$$l_{pa} = \frac{l - n_{vk}b_{vk}}{n_{vk} + 1} = 44,8 \text{ mm}$$

$$l_{Fe} = l_{pa}(n_{vk} + 1) = 313,3 \text{ mm}$$

3.2.1 Návrh drážek a vinutí statoru

Pro vinutí statoru motoru se používají dvouvrstvá cívková vinutí, která mají více než dva efektivní vodiče v každé drážce. Každý efektivní vodič se pak může skládat z více dílčích vodičů o průřezu 12–20 mm². Pokud jmenovitý fázový proud I_{Nf} překračuje hodnotu 50 A navrhuje se více paralelních větví tak, aby proud v každé větvi nepřesahoval 50 A.

Jmenovitý fázový proud motoru lze spočítat z jmenovitých hodnot výkonu a napětí:

$$I_{Nf} = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\eta\cos\varphi} = 56,45 \text{ A} \quad (3.7)$$

Počet paralelních větví a se určuje jako (zaokrouhleno nahoru):

$$a = \frac{I_{Nf}}{50} = 1,13 \div 2 \quad (3.8)$$

Volba optimálního počtu drážek se vychází ze zkušeností s návrhem podobných strojů. Vychází se z drážkové rozteče τ_{ds} , jejíž rozmezí lze určit z Obr. A.4 v závislosti na pólové rozteči a velikosti stroje. U navrhovaného stroje byla určena drážková rozteč τ_{ds} (0,031–0,035) m. Poté lze určit rozmezí počtu drážek podle vztahu:

$$Q_s = \frac{\pi D_s}{\tau_{ds}} = (79,88\text{--}90,19) \quad (3.9)$$

Z tohoto rozmezí je pak voleno celé číslo podle následujících požadavků:

1. Počet drážek Q_s musí být dělitelný počtem fází m a počtem paralelních větví a .
2. Počet drážek na pól a fázi $q_s = \frac{Q_s}{2pm}$ musí být celé číslo (pak jde o tzv. celistvé vinutí) nebo zlomek $q_s = \frac{q_0}{c}$ v základním tvaru (zlomkové vinutí), kde jmenovatel c musí být menší, než počet pólových dvojic p a nesmí být dělitelný počtem fází m .

S ohledem na požadavky byl tedy pro navrhovaný motor zvolen počet drážek statoru $Q_s = 90$ s odpovídajícím počtem drážek na pól a fázi $q_s = \frac{90}{12 \cdot 3} = 5/2$.

Poté je možné určit počet efektivních vodičů v drážce N_{ef} (zaokrouhleno na nejbližší sudé číslo) a upřesnit drážkovou rozteč statoru:

$$N_{ef} = \frac{\pi a D_s A}{Q_s I_{Nf}} = 48,4 \div 48 \quad (3.10)$$
$$\tau_{ds} = \frac{\pi D_s}{Q_s} = 0,031 \text{ m}$$

Z určeného počtu efektivních vodičů v drážce V_d je pak určena přesná hodnota lineární hustoty proudu:

$$A = \frac{Q_s I_{Nf} N_{ef}}{\pi a D_s} = 441,69 \cdot 10^2 \text{ Am}^{-1} \quad (3.11)$$

Dále je nutné určit rozměry statorových drážek. Z hlediska využití stroje lze najít optimální poměr šířky drážky a drážkové rozteče. Pro stroje o výkonu větším než 100 kW lze použít pravoúhlé drážky s rovnoběžnými stěnami, u kterých je optimální šířka drážky rovna:

$$b_{ds} = (0,34-0,5) \tau_{ds} \quad (3.12)$$

Konečná šířka se pak volí podle zvoleného vodiče vinutí. Průřez efektivního vodiče vinutí je možné určit podle vztahu:

$$S_{ef} = \frac{I_{Nf}}{a\sigma_s} = 7,70 \text{ mm}^2, \quad (3.13)$$

kde dovolenou hustotu proudu σ_s lze určit ze součinu $A\sigma_s$, získaného ze závislosti $A\sigma_s = f(\tau_p)$ na Obr. A.5. Dovolená hustota proudu je:

$$\sigma_s = \frac{A\sigma_s}{A} \quad (3.14)$$

Pro navrhovaný motor je tedy optimální šířka drážky:

$$b_{ds} = 12 \text{ mm}$$

Podle takto volené šířky vodiče je volen normalizovaný vodič (bez izolace) podle Tabulky B.1. Oboustranná tloušťka izolace vodiče je 0,37 mm. Zároveň s normalizovanou šířkou volíme i výšku vodiče a jeho průřez, ze kterého je pak vynásobením počtem dílčích vodičů určen přesný průřez efektivního vodiče vinutí.

Šířku izolovaných vodičů pro navrhovaný motor lze získat odečtením dvoustranné tloušťky izolace drážky, pro napětí 6 000 V lze uvažovat tloušťku 3,6 mm:

$$b_{vi} = 8,4 \text{ mm}$$

Byl zvolen vodič s rozměry $b_v \times h_v = 8 \times 1 \text{ mm}$, s izolací je to $b_{vi} \times h_{vi} = 8,37 \times 1,37 \text{ mm}$ a průřezem $S_{ef} = 7,79 \text{ mm}^2$.

Poté je možné upřesnit rozměry drážky b_{ds} a h_{ds} :

$$b_{ds} = n_s b_{vi} + \Delta_{id} + 0,05 n_s + 0,2 \quad (3.15)$$

$$h_{ds} = 2 \left(\frac{N_{ef}}{2} n_v h_{vi} + 2\Delta_f \right) + \Delta_{id} + h_k + \Delta_d + \Delta_m + 0,05 N_{ef} n_v + 0,2, \quad (3.16)$$

kde n_s a n_v jsou počty vodičů na šířku a výšku drážky.

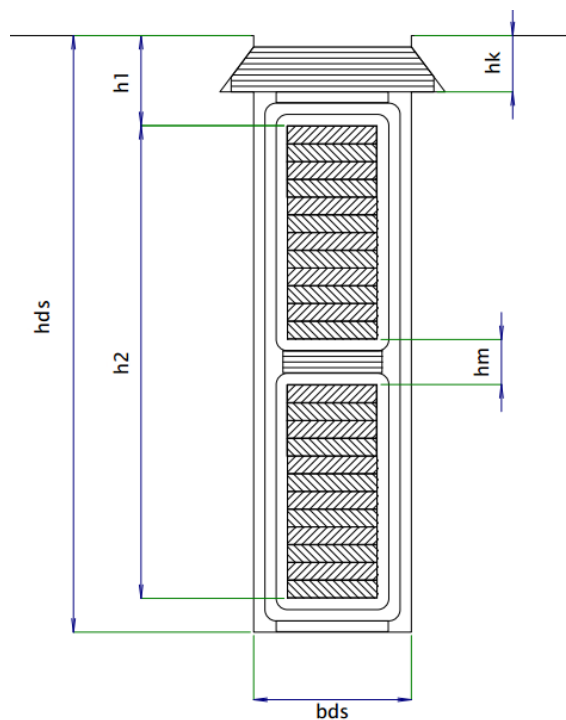
$\Delta_f = 0,4 \text{ mm}$ je mezifázová izolace.

$\Delta_{id} = 4 \text{ mm}$ je dvoustranná tloušťka izolace drážky, běžně se používá izolace třídy F.

$h_k = 4 \text{ mm}$ je výška klínové části drážky a vložky pod klín,

$\Delta_d = 1 \text{ mm}$ je tloušťka vložky na dno drážky a $\Delta_m = 1,5 \text{ mm}$ je mezivložka,

$0,05 n_s$ a $0,05 N_{ef} n_v$ jsou přírůstky na deformaci izolace na šířku a na výšku a 0,2 mm je vůle.



Obr. 3.2: Drážka statoru

Pro navrhovaný motor jsou přesné rozměry drážky tedy $h_{ds} = 81,6 \text{ mm}$ a $b_{ds} = 12,2 \text{ mm}$ (jedná se odrážku typu N podle Obr. 3.2).

Potom je možné upřesnit hodnotu hustoty proudu ve statorovém vinutí:

$$\sigma_s = \frac{I_{Nf}}{a S_{ef}} = 3,66 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \quad (3.17)$$

Pro určení rozměry statorové drážky je pak vhodné provést kontrolu maximální magnetické indukce v zubu a jhu statoru a teplotní spád v drážkové izolaci.

3.2.2 Parametry statorového vinutí

Počet závitů v jedné fázi statorového vinutí je možné určit z počtu efektivních vodičů v drážce statoru:

$$N_s = 2pq_s \frac{N_{ef}}{2} \cdot \frac{1}{a} = 360 \quad (3.18)$$

Z pólové rozteče v počtu drážek $Q_p = 3q_s = 7,5$ je určen krok vinutí y (zaokrouhleno na celé číslo):

$$y = 0,8Q_p = 6 \quad (3.19)$$

Činitel zkrácení kroku k_y a činitel rozlohy vinutí k_r lze určit podle vztahů:

$$k_y = \sin \left(\frac{y}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0,951 \quad (3.20a)$$

$$k_r = \frac{0,5}{q_s \cdot \sin \left(\frac{30^\circ}{q_s} \right)} = 0,957 \quad (3.20b)$$

Pokud se jedná o zlomkové vinutí, je nutné dosadit místo počtu drážek na pól a fázi q_s jen čítec zlomku $q_s = \frac{q_0}{c}$.

Poté již je možné spočítat celkový činitel statorového vinutí:

$$k_{vs} = k_y k_r = 0,910 \quad (3.21)$$

3.3 Návrh motoru s budicím vinutím

V případě stroje s budicím vinutím jsou po návrhu statoru nejprve stanoveny rozměry vzduchové mezery a rotoru, dále je navrženo tlumicí vinutí a je proveden magnetický výpočet. Potom je vypočteno budicí vinutí a jsou dpočteny odpory a reaktance motoru. Nakonec jsou určeny hmotnosti a ztráty motoru.

3.3.1 Rozměry vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery výrazně ovlivňuje výkon stroje. Větší mezera způsobuje větší reaktanci a tím redukuje vliv reakce kotvy. To znamená, že stroj s větší vzduchovou mezerou má menší podélnou synchronní reaktanci. Zároveň ale s větší vzduchovou mezerou je nutný větší magnetický tok.[10]

Při volbě velikosti vzduchové mezery se vychází z podélné synchronní reaktance x_d , na které závisí momentová a výkonová přetížitelnost motoru. Podélnou synchronní reaktanci v poměrných jednotkách lze určit ze závislosti na Obr. A.6. Zadané hodnotě momentové přetížitelnosti $m_{\max} = 2,2$ odpovídá podélná synchronní reaktance $x_d = 1,3$.

Poté lze určit velikost vzduchové mezery v ose pólu podle přibližného vztahu:

$$\delta = (0,27 \text{ až } 0,33) \cdot 10^{-6} \frac{A}{0,95 B_\delta} \frac{\tau_p}{x_d} = 2,6 \text{ mm} \quad (3.22)$$

Vzduchová mezera se u běžně používaných strojů navrhuje nekonstantní kvůli získání přibližně sinusového rozložení magnetického pole. Proto je maximální velikost vzduchové mezery pod konci pólových nástavců přibližně $\delta_{\max} = 1,5\delta = 4,0 \text{ mm}$.

Střední hodnota velikosti vzduchové mezery pak je:

$$\delta' = \delta + 1/3 (\delta_{\max} - \delta) = 3,10 \text{ mm} \quad (3.23)$$

3.3.2 Návrh pólů a jha rotoru

Vnější průměr rotoru je:

$$D_r = D_s - 2\delta' = 875,7 \text{ mm} \quad (3.24)$$

Šířka pólového nástavce se volí podle vztahu:

$$b_{pn} = \alpha t_p = 0,163 \text{ m}, \quad (3.25)$$

kde α je pólové krytí, které se volí obvykle mezi 0,68 až 0,73.

Aby byl dodržen sinusový průběh magnetického pole ve vzduchové mezeře, volí se poloměr zakřivení pólového nástavce R_p o něco menší než poloměr vrtání statoru $D_s/2$:

$$R_p = \frac{D_s}{2 + 8D_s \frac{\delta_{\max} - \delta^2}{b_{pn}}} = 0,377 \text{ m} \quad (3.26)$$

Výška pólového nástavce h_{pn} se volí tak, aby se do něj mohly umístit tyče tlumicího vinutí. Volí se podle Tab. 3.5 v závislosti na pólové rozteči.

Tab. 3.5: Výška pólových nástavců[7]

τ_p [m]	0,15 až 0,2	0,2 až 0,3	0,3 až 0,4	0,4 až 0,5	0,5 až 0,6
h_{pn} [mm]	22 až 30	30 až 40	40 až 50	50 až 60	60 až 75

Délka pólového nástavce l_{pn} a délka pólu l_p se volí stejná jako délka statoru l nebo o 10 až 20 mm menší. Byla tedy stanovena výška pólového nástavce $h_{pn} = 33,3 \text{ mm}$ a délky $l_{pn} = l_p = l - 0,01 = 0,363 \text{ m}$.

Předběžná výška jádra pólu se určí v závislosti na velikosti stroje:

- Pro stroje o průměru statoru větším než 1 m:

$$h_p = 0,016 + 0,186 \sqrt[4]{\tau_p} \quad (3.27)$$

- Pro stroje o průměru statoru mezi 0,5 a 1 m a počtu pólů $2p > 6$:

$$h_p = 10,5\delta + 0,08$$

- Pro stroje o průměru statoru mezi 0,5 a 1 m a počtu pólů $2p \leq 6$:

$$h_p = (0,45 \text{ až } 0,55) b_{pn}$$

- Pro stroje o výkonu $P_N < 100 \text{ kW}$:

$$h_p = (0,3 \text{ až } 0,35) D_s - (h_{pn} + \delta)$$

Pro navrhovaný motor je tedy výška jádra pólu podle (3.27):

$$h_p = 0,016 + 0,186\sqrt[4]{\tau_p} = 0,133 \text{ m}$$

Šířka jádra pólu b_p se určí z dovolené hodnoty magnetické indukce v pólu B_p s uvažováním rozptylového toku σ_p :

$$b_p = \frac{\alpha_\delta B_\delta \tau_p l_i}{B_p k_{Fe} l'_p} \sigma_p = 0,126 \text{ m} \quad (3.28)$$

Magnetická indukce B_p se volí 1,4 až 1,6 T. α_δ je hodnota výpočtového činitele pólového krytí, kterou lze získat z Obr. A.7 podle hodnoty pólového krytí α a poměru δ/τ_p . Činitel rozptylu pólů σ_p lze určit předběžně podle vztahu:

$$\sigma_p = 1 + k \frac{0,35\delta}{\tau_p^2}, \quad (3.29)$$

kde činitel k závisí na výšce pólového nástavce podle Tabulky 3.6.

Tab. 3.6: Činitel k v závislosti na výšce pólových nástavců[7]

h_{pn} [mm]	30	40	50	60	70
k [-]	7	8,5	10	11	12

Byla zvolena magnetická indukce $B_p = 1,43 \text{ T}$, výpočtový činitel pólového krytí $\alpha_\delta = 0,66$ (podle Obr. A.7) a činitel rozptylu pólů (podle (3.29)) $\sigma_p = 1,115$.

Výpočtovou osovou délku jádra pólu je možné určit přičtením tloušťky přítlačné podložky pólu, která je obvykle 1,5 až 3 cm.

$$l'_p = l_p + 0,02 = 0,383 \text{ m}, \quad (3.30)$$

Délka rotorového jha se obvykle navrhuje o něco větší, než je nutné pro vedení magnetického toku. Rozměry jha i pólů jsou navíc dané konstrukcí a mechanickou pevností stroje, při konstrukčním návrhu stroje se dále upřesňují. Délky rotorového jha je možné vypočítat podle vztahu:

$$l_{jr} = l_p + \Delta l_{j2}, \quad (3.31)$$

kde přírůstek délky Δl_{j2} je pro velké stroje 10 až 15 cm, pro střední stroje 4 až 5 cm a pro malé stroje je nulový.

Minimální výška rotorového jha se volí pomocí vztahu:

$$h_{jr} = \frac{\alpha_\delta B B_\delta \tau_p l_i}{2 B_{jr} l_{jr}} \sigma_p, \quad (3.32)$$

kde indukce ve jhu rotoru B_{jr} se volí 1 až 1,3 T.

Předběžné rozměry rotorového jha tedy jsou:

$$\begin{aligned} l_{jr} &= l_p + 0,12 = 0,483 \text{ m} \\ h_{jr} &= 0,050 \text{ m} \end{aligned}$$

Průměr rotorového jha je:

$$D_j = D_r - 2h_p - 2h_{pn} = 551,0 \text{ mm} \quad (3.33)$$

Vnitřní průměr rotoru se určí jako:

$$D_i = D_j - 2h_{jr} = 451,0 \text{ mm} \quad (3.34)$$

3.3.3 Výpočet tlumicího vinutí

Tlumicí (rozběhové) vinutí motoru se ukládá do drážek v pólových nástavcích rotoru. Vinutí se skládá z určitého počtu tyčí a ze segmentů nakrátko, které uzavírají tyče nakrátko. Tyče tlumicího vinutí jsou obvykle měděné, pro dosažení vyššího záběrného momentu se někdy používají i mosazné tyče. Počet tyčí na pól N_t se volí 5 až 10. Aby se snížily přídavné ztráty, volí se počet tyčí a drážková rozteč tak, aby platilo:

$$\tau_{dr} \geq 0,8\tau_{ds} \quad (3.35a)$$

$$(N_t - 1) \left(1 - \frac{\tau_{dr}}{\tau_{ds}} \right) > 0,75 \quad (3.35b)$$

Drážkovou rozteč na rotoru τ_{dr} je možné určit jako:

$$\tau_{dr} = \frac{b_{pn} - d_t - 2z}{N_t - 1}, \quad (3.36)$$

kde z je vzdálenost od krajní drážky k okraji pólového nástavce. Běžně se volí $z \geq 0,7 \text{ cm}$.

Pro navrhovaný motor se volí nejmenší počet tyčí, aby platily podmínky dle (3.35), tedy $N_t = 6$ s odpovídající drážkovou roztečí $\tau_{dr} = 25,9 \text{ mm}$, potom je stanoven jejich průřez S_t a průměr d_t . Průřez tyče lze určit podle vztahu:

$$S_t = \frac{(0,15 \text{ až } 0,35) \tau_p A}{N_t \sigma_s} = 140,1 \text{ mm}^2 \quad (3.37)$$

Průměr tyče tlumicího vinutí d_t se spočte podle rovnice:

$$d_t = 1,13\sqrt{S_t} = 13,4 \text{ mm} \quad (3.38)$$

Drážky na rotoru se volí kruhové, průměr drážky d_d je o 0,1 mm větší než průměr tyče, tedy $d_d = 13,5 \text{ mm}$. Šířka otevření drážky b_0 je 4 mm a výška krčku $h_0 = 2 \text{ mm}$. Délku tyče je možné předběžně zvolit jako:

$$l_t = l_{pn} + 0,35\tau_p = 0,445 \text{ m} \quad (3.39)$$

Průřez segmentu nakrátko se určí tak, aby byl polovinou průřezu všech tyčí jednoho pólu:

$$S_k = 0,5S_t N_t = 420,4 \text{ mm}^2 \quad (3.40)$$

3.3.4 Výpočet magnetického obvodu

Cílem výpočtu je určení magnetomotorického napětí budicího vinutí U_m , které je potřebné k vytvoření magnetického toku Φ stroje při chodu naprázdno. Vztažnou hodnotu magnetomotorického napětí určíme pro $U_i = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,1 \text{ V}$.

Magnetomotorické napětí budicího vinutí je možné určit jako součet magnetických napětí jednotlivých částí magnetického obvodu motoru:

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mzs} + U_{mjs} + U_{mzr} + U_{mp} + U_{m\delta p} + U_{mjr} \quad (3.41)$$

Pro určení magnetických napětí potřebujeme znát hodnoty magnetických indukcí v jednotlivých částech motoru. Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_δ :

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau_p l_i} = 0,846 \text{ T} \quad (3.42)$$

Magnetický tok Φ potřebný k vytvoření daného indukovaného napětí:

$$\Phi = \frac{U_i}{4k_B f N_s k_{vs}} = 0,046 \text{ Wb}, \quad (3.43)$$

kde k_B je činitel tvaru pole, tedy poměr efektivní hodnoty indukce ke střední hodnotě. Činitel k_B je možné určit z Obr. A.7.

Magnetickou indukci v zubu statoru B_{zs} je možné určit jako:

$$B_{zs} = \frac{B_\delta \tau_{ds} l_i}{b_{z11/3} l_{Fe} k_{Fe}} = 1,51 \text{ T}, \quad (3.44)$$

kde $b_{z11/3}$ je šířka zubu v jedné třetině výšky, $b_{z11/3} = \frac{\pi(D_s + 2/3 h_{ds})}{Q_s} - b_{ds}$.

Magnetická indukce ve jhu statoru B_{js} je:

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2l_{Fe} h_{js} k_{Fe}} = 1,20 \text{ T}, \quad (3.45)$$

kde výška jha statoru h_{js} je:

$$h_{js} = \frac{D_o - D_s}{2} - h_{ds} = 64,4 \text{ mm} \quad (3.46)$$

Magnetická indukce v zubu rotoru B_{zr} je podle vztahu:

$$B_{zr} = \frac{B_\delta \tau_{dr} l_i}{b_{z21/3} l_{pn} k_{Fe}} = 1,74 \text{ T} \quad (3.47a)$$

$$b_{z21/3} = \frac{D_s - 2\delta - 2/3(h_{dr} + d_d)}{D_s - 2\delta'} \tau_{dr} - 0,94d_d \quad (3.47b)$$

Při výpočtu magnetické indukce v základně pólu je nutné uvážit také rozptylový magnetický tok ze vztahu:

$$\Phi_{\sigma} = 4\lambda_{\sigma}l'_{\text{p}}(U_{\text{m}\delta} + U_{\text{mzs}} + U_{\text{mjs}} + U_{\text{mzr}}), \quad (3.48)$$

kde poměrnou magnetickou vodivost pro rozptylový tok λ_{σ} lze vypočíst ze vztahu¹:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{pl}} + \lambda_{\text{pč}} + \lambda_{\text{pn}} \quad (3.49)$$

$$\lambda_{\text{pl}} = \frac{0,55h_{\text{p}}}{\tau_{\text{p}} - b_{\text{p}} - \pi/2p \cdot (h_{\text{p}} + 2h_{\text{pn}} + 2\delta')} \cdot 10^{-6} \quad (3.50a)$$

$$\lambda_{\text{pč}} = 0,37 \frac{b_{\text{p}}}{l'_{\text{p}}} \cdot 10^{-6} \quad (3.50b)$$

$$\lambda_{\text{pn}} = \left[1,4 \left(\frac{d_{\text{p}}}{a'_{\text{p}}} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_{\text{p}}}{a'_{\text{p}}} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{c_{\text{p}}}{a'_{\text{p}}} - 0,5 \right)^2 \right] \cdot 10^{-6} \quad (3.50c)$$

Magnetická indukce u základny pólu B_{p} je pak:

$$B_{\text{p}} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{l'_{\text{p}}b_{\text{p}}k_{\text{Fe}}} = 1,32 \text{ T} \quad (3.51)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru B_{jr} :

$$B_{\text{jr}} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{2l'_{\text{jr}}h_{\text{jr}}} = 1,11 \text{ T} \quad (3.52)$$

Délku indukční čáry ve jhu rotoru l'_{jr} lze spočíst jako:

$$l'_{\text{jr}} = \frac{\pi [D_{\text{s}} - 2\delta - 2(h_{\text{p}} + h_{\text{pn}}) - h_{\text{jr}}]}{4p} \quad (3.53)$$

Z vypočtených hodnot magnetické indukce jsou určeny příslušné intenzity magnetického pole pomocí magnetizačních křivek příslušného materiálu (podle tabulky B.3). V současné době se používají plechy pro elektrotechniku skupiny M, u navrhovaného motoru je počítáno s plechy M400-50A. Hodnoty intenzit magnetického pole jsou tedy:

$$H_{\text{zs}} = 1387 \text{ Am}^{-1}$$

$$H_{\text{js}} = 179 \text{ Am}^{-1}$$

$$H_{\text{zr}} = 7902 \text{ Am}^{-1}$$

$$H_{\text{p}} = 294 \text{ Am}^{-1}$$

$$H_{\text{jr}} = 141 \text{ Am}^{-1}$$

¹Pomocné veličiny v rovnici (3.50) jsou $c_{\text{p}} = (b_{\text{pn}} - b_{\text{p}})/2$, $a'_{\text{p}} = \tau_{\text{p}} - b_{\text{pn}} - \pi d_{\text{p}}/p$ a $d_{\text{p}} = h_{\text{pn}} + \delta - b_{\text{pn}}^2/4D_{\text{s}}$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře $U_{m\delta}$ je možné určit ze vztahu:

$$U_{m\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_c = 2383,1 \text{ A}, \quad (3.54)$$

kde k_c je Carterův činitel, který je součinem Carterova činitele pro stator k_{c1} a pro rotor k_{c2} .

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,341 \quad (3.55)$$

$$k_{c1} = \frac{\tau_{ds} + 10\delta'}{\tau_{ds} - b_{ds} + 10\delta'} \quad (3.56a)$$

$$k_{c2} = \frac{\tau_{dr} + 10\delta'}{\tau_{dr} - b_{dr} + 10\delta'} \quad (3.56b)$$

Magnetické napětí v zubu statoru U_{mzs} lze vypočítat podle vztahu:

$$U_{mzs} = H_{zs} h_{ds} = 113,14 \text{ A} \quad (3.57)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru U_{mjs} :

$$U_{mjs} = c_s H_{js} l'_{js} = 10,49 \text{ A} \quad (3.58)$$

Činitel c_s je možné určit z Obr. A.8 v závislosti na B_{js} , jedná se o činitel respektující vliv nerovnoměrného rozložení magnetického pole v průřezu jha statoru.

Délku indukční čáry ve jhu statoru l'_{js} je možné spočítat podle vztahu:

$$l'_{js} = \frac{\pi (D_o - h_{js})}{4p} \quad (3.59)$$

Magnetické napětí v zubu rotoru U_{mzr} :

$$U_{mzr} = H_{zr} (h_{dr} + d_d) = 122,29 \text{ A} \quad (3.60)$$

Magnetické napětí pólu U_{mp} :

$$U_{mp} = H_p (h_p + h_{pn}) = 38,80 \text{ A} \quad (3.61)$$

Magnetické napětí styku mezi pólem a jhem rotoru $U_{m\delta p}$ je možné určit podle vztahu:

$$U_{m\delta p} = 250 B_p = 330,77 \text{ A} \quad (3.62)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru U_{mjr} lze určit jako:

$$U_{mjr} = H_{jr} l_{jr} = 9,27 \text{ A} \quad (3.63)$$

Poté je vypočtena celková hodnota magnetomotorického napětí podle (3.41):

$$U_m = 3007,9 \text{ A}$$

Vypočtením magnetomotorické napětí pro různé hodnoty indukovaného napětí je vytvořena charakteristika naprázdno $U_i = f(U_m)$. Tuto charakteristiku je vhodné vyjádřit v poměrných jednotkách a porovnat s normální charakteristikou danou hodnotami v Tabulce 3.7. Zjištěná charakteristika by měla být blízká normální, není ale nutné, aby byly totožné (viz Obr. 3.3).

Pro další výpočty je potřeba kromě charakteristiky naprázdno znát také dílčí magnetizační charakteristiky $\varphi = f(u_{\delta zj})$, $\varphi_\sigma = f(u_{\delta zj})$ a $\varphi_p = f(u_{pj})$, viz Obr. 3.4, přičemž $\Phi_p = \Phi + \Phi_\sigma$, $U_{\delta zj} = U_{m\delta} + U_{mzs} + U_{mjs} + U_{mzr}$ a $U_{pj} = U_{m\delta p} + U_{mp} + U_{mjr}$.²

Tab. 3.7: Normální charakteristika naprázdno[7]

u_i [-]	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
f_{b0} [-]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

3.3.5 Odpory a reaktance statorového vinutí

Vztažná hodnota impedance je:

$$Z_{vz} = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = 60,72 \Omega \quad (3.64)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí je možné spočítat podle vztahu:

$$R_s = \frac{\rho_{Cu\vartheta} N_s l_{zs}}{S_{ef} a} = 0,85 \Omega, \quad (3.65)$$

kde $\rho_{Cu\vartheta}$ je rezistivita vodiče při pracovní teplotě ϑ , lze ji spočítat z rezistivity při teplotě 20 °C $\rho_{Cu20} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$:

$$\rho_{Cu\vartheta} = \left(1 + \frac{\vartheta - 20}{234,5 + 20}\right) \rho_{Cu20} \quad (3.66)$$

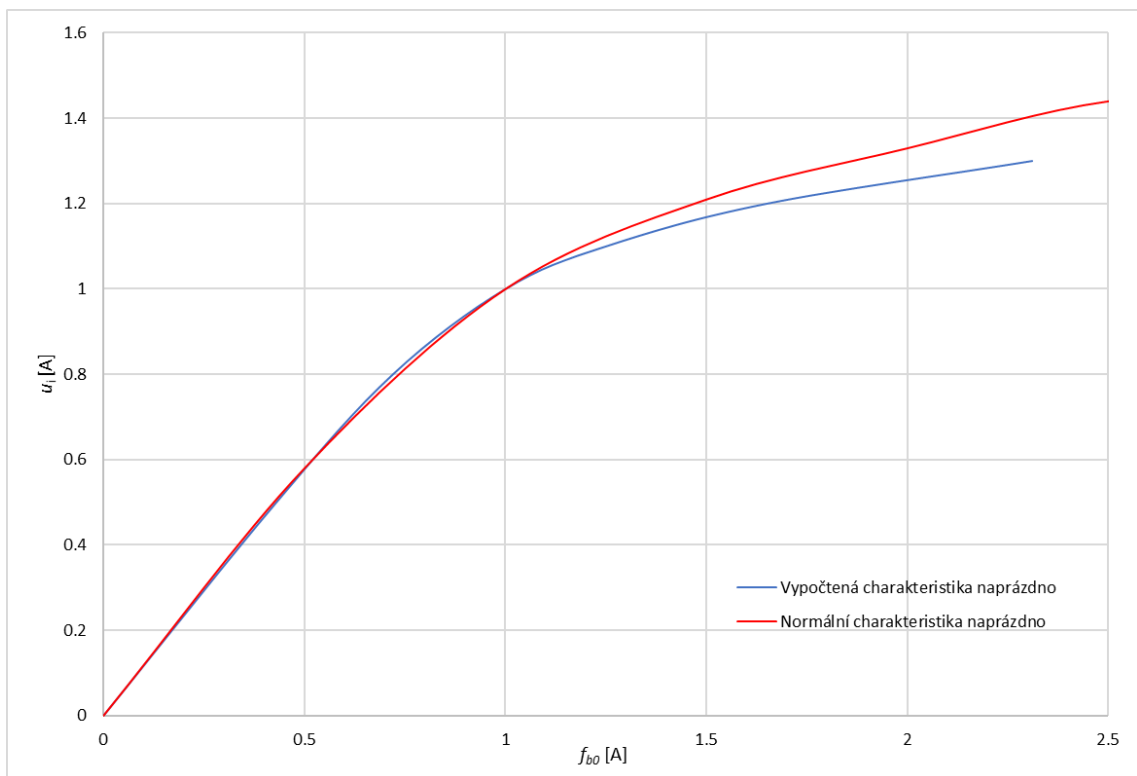
l_{zs} je délka závitu statorového vinutí podle vztahu:

$$l_{zs} = 2[l_z + l_c] = 2 \cdot \left[l + \frac{0,8\pi(D_s + h_{ds})}{2p\sqrt{1 - \frac{b_{ds} + S_{ef}}{\tau_{ds}^2}}} + h_{ds} + 0,1 \right] \quad (3.67)$$

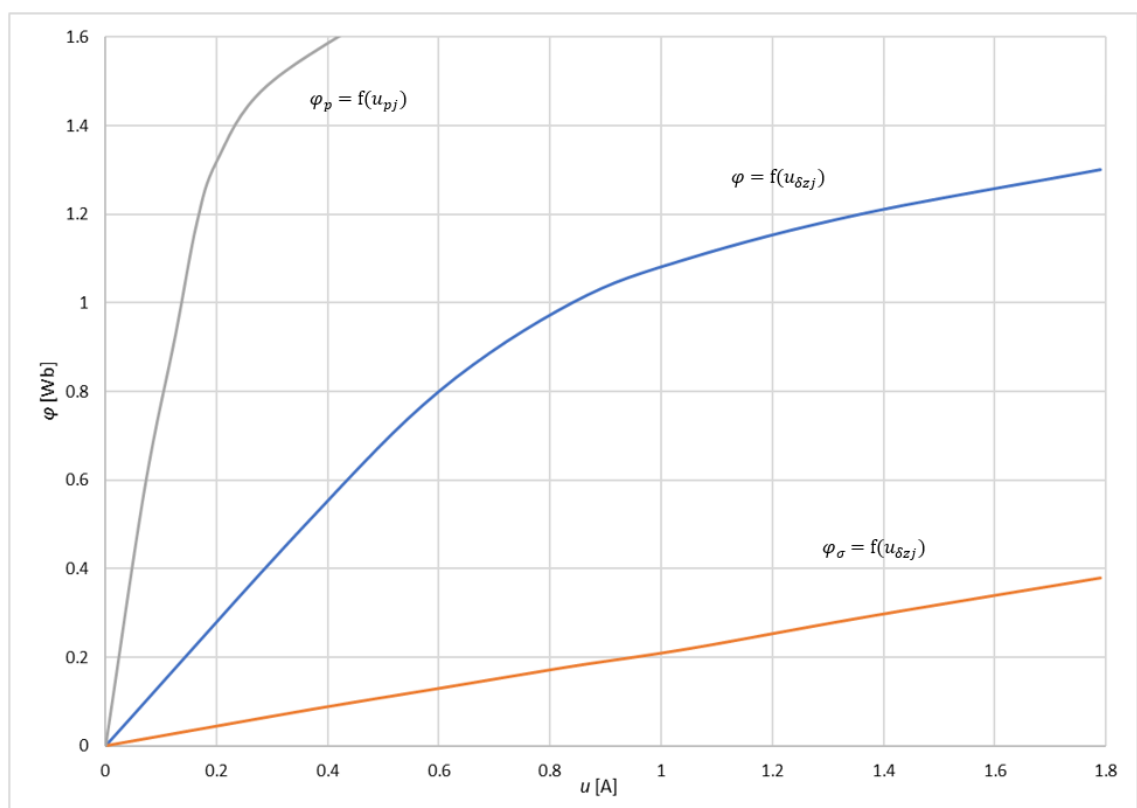
Hodnota odporu v poměrných jednotkách je:

$$r_s = \frac{R_s}{Z_{vz}} = 0,0140 \quad (3.68)$$

²Charakteristiky jsou v poměrných jednotkách (značeno malými písmeny), magnetické toky jsou získané dělením vztažnou hodnotou magnetického toku $\Phi = 0,046 \text{ Wb}$ a magnetická napětí dělením vztažnou hodnotou magnetomotorického napětí $U_m = 3499,88 \text{ A}$.



Obr. 3.3: Charakteristika naprázdno



Obr. 3.4: Dílčí magnetizační charakteristiky

Hodnota rozptylové reaktance fáze statoru je:

$$X_\sigma = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{N_s}{100} \right)^2 \frac{l_i}{pq_s} (\lambda_d + \lambda_c + \lambda_{\text{dif}}) = 8,19 \, \Omega, \quad (3.69)$$

kde činitele poměrné magnetické vodivosti v drážce, čel vinutí a diferenčního rozptylu lze získat podle vztahů³⁴:

$$\lambda_d = \lambda'_d + 0,85 \left[\alpha \lambda'_h + \left(0,22 + 0,32 \sqrt{\frac{\tau_{\text{ds}} - b_{\text{ds}}}{b_{\text{ds}}}} \right) (1 - \alpha) \right] \quad (3.70a)$$

$$\lambda'_d = 0,89 \frac{h_2 - h_m}{3b_{\text{ds}}} + 0,85 \frac{h_1}{b_{\text{ds}}} + \frac{h_m}{4b_{\text{ds}}} \quad (3.70b)$$

$$\lambda_c = 0,34 \frac{q_1}{l_1 - 0,5n_{\text{vk}}b_{\text{vk}}} (l_c - 0,512\tau_p) \quad (3.70c)$$

$$\lambda_{\text{dif}} = 0,03 \frac{\tau_p \alpha_\delta}{\delta' k_c q_s} \quad (3.70d)$$

Rozptylová reaktance v poměrných jednotkách je:

$$x_\sigma = \frac{X_\sigma}{Z_{\text{vz}}} = 0,1349 \quad (3.71)$$

Reaktance podélné a příčné reakce kotvy x_{ad} a x_{aq} v poměrných jednotkách lze určit podle vztahů:

$$x_{\text{ad}} = \frac{k_{\text{ad}} U_{\text{ma}}}{k_f U_{\text{m}\delta}} = 1,303 \quad (3.72)$$

$$x_{\text{aq}} = \frac{k_{\text{aq}} U_{\text{ma}}}{k_f U_{\text{m}\delta}} \frac{1 + k_c}{2} = 0,719, \quad (3.73)$$

kde magnetomotorické napětí reakce kotvy U_{ma} lze získat ze vztahu:

$$F_{\text{aN}} = 0,45m \frac{N_1 k_{v1}}{p} I_{\text{Nf}} = 4205 \, \text{A}, \quad (3.74)$$

činitele k_{ad} a k_{aq} je možné určit podle Obr. A.10 v závislosti na činiteli pólového krytí α , činitel k_f je podíl:

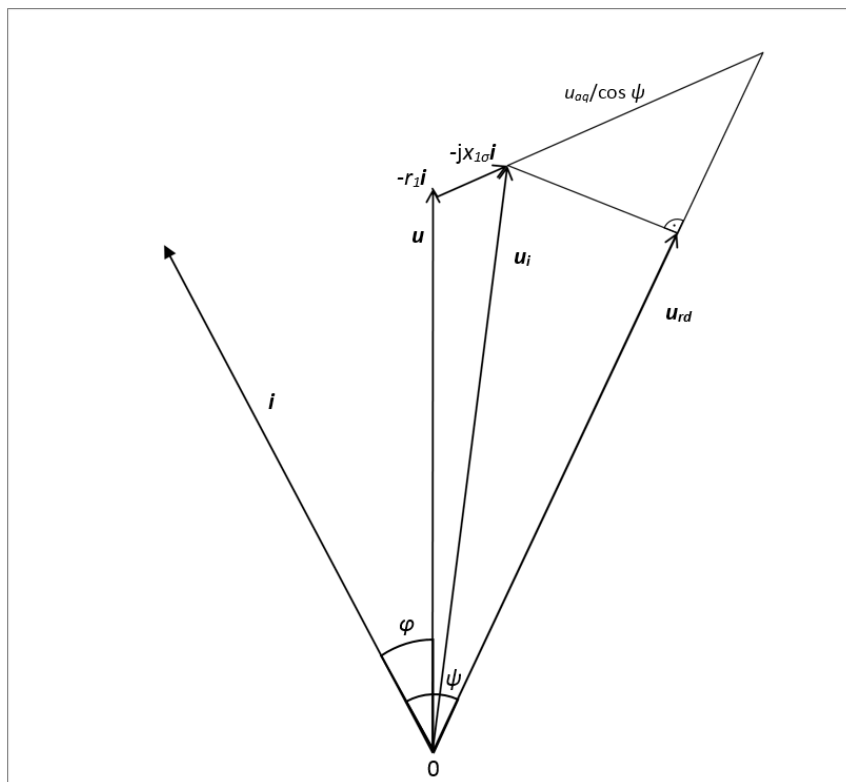
$$k_f = \frac{U_m(u_i = 0,5)}{0,5U_{\text{m}\delta}} \quad (3.75)$$

Pak již lze určit celkovou podélnou synchronní reaktanci:

$$x_d = x_{\text{ad}} + x_\sigma = 1,453 \quad (3.76)$$

Celková příčná synchronní reaktance:

$$x_q = x_{\text{aq}} + x_\sigma = 0,868 \quad (3.77)$$



Obr. 3.5: Fázorový diagram

3.3.6 Budicí vinutí

Při výpočtu magnetomotorického napětí budicího vinutí se vychází z fázorového diagramu Obr. 3.5, při jeho sestrojení se používají poměrné jednotky.

Základem je sestrojení fázorů napětí u a proudu i , mezi kterými je úhel φ . Přičtením $-r_s i$ a $-j x_{1\sigma} i$ k fázoru napětí je vypočteno indukované napětí u_i . Toto napětí je použito k získání poměru $U_{\delta zj1}/U_{m\delta}$ ze závislosti $u_i = f(U_{\delta zjs}/U_{m\delta})$ na Obr. 3.6. Z tohoto poměru jsou určeny koeficienty k , κ_d a κ_q z Obr. A.11.

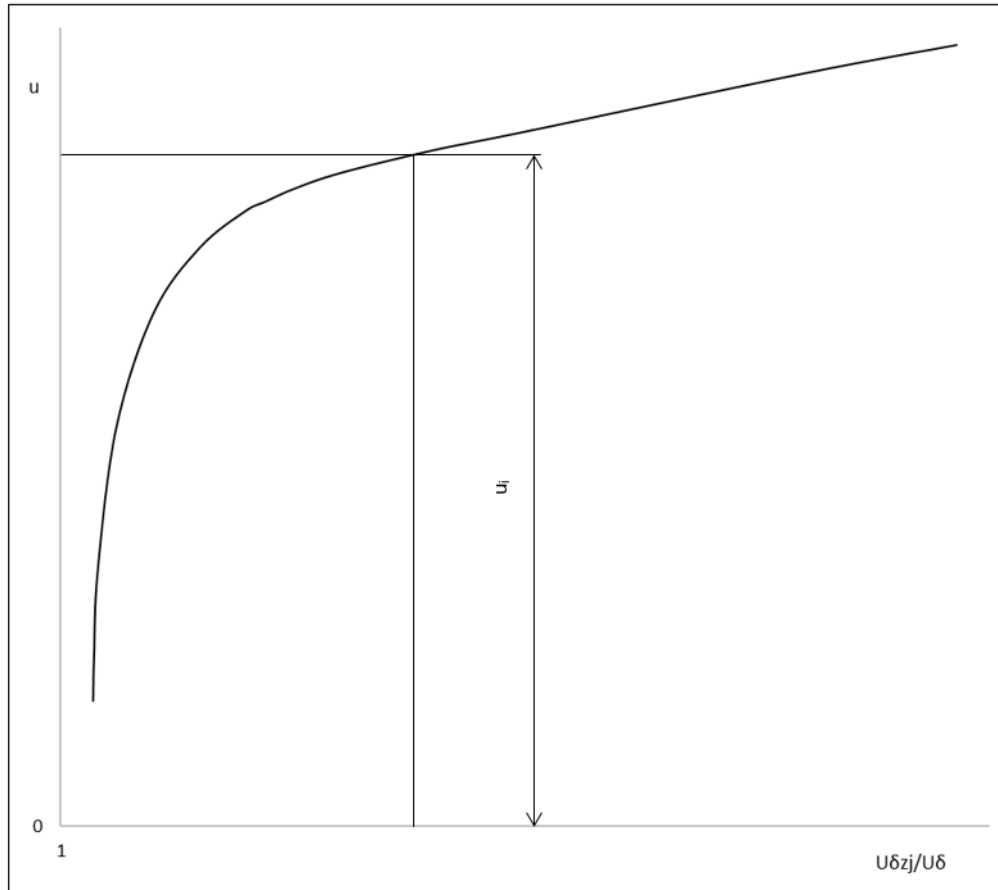
Magnetomotorické napětí reakce kotvy $f_a = U_{ma}/U_m$ je vyneseno na vodorovnou osu dílčí magnetizační charakteristiky $u = \varphi = f(u_{\delta zj})$ (Obr. 3.4) a na svislé ose je elektromotorické napětí s hodnotou $e_{aq}/\cos \psi$.

Přičtením napětí $e_{aq}/\cos \psi$ k fázoru $-j x_{1\sigma} i$ je zjištěn směr elektromotorického napětí $u_{rd} = \varphi_{rd}$ a úhel ψ . Velikost tohoto napětí lze určit spuštěním kolmice z koncového bodu fázoru indukovaného napětí u_i na směr elektromotorického napětí u_{rd} .

Pomocí elektromotorického napětí u_{rd} je z magnetizační charakteristiky $u = f(u_{\delta zj})$ na Obr. 3.4 určeno magnetomotorické napětí f_{rd} .

³Činitel magnetické vodivosti λ'_h lze získat z Obr. A.9 v závislosti na poměru $\frac{b_{dr}}{\delta k_c}$.

⁴Rozměry drážky h_1 , h_2 a h_m jsou podle Obr. 3.2



Obr. 3.6: Závislost $u_i = f(U_{\delta zj1}/U_{\delta})$ [7]

Magnetomotorické napětí podélné reakce kotvy f_{ad} je možné určit ze vztahu:

$$f_{ad} = \kappa_d k_{ad} f_a \sin \psi + k \frac{\tau_p}{\delta} f_a \cos \psi \quad (3.78)$$

Ze součtu $f_{rd} + f_{ad}$ je z charakteristiky $\varphi_{\sigma} = f(u_{\delta zj})$ na Obr. 3.4 stanoven rozptylový tok φ_{σ} a ze součtu $\varphi_{\sigma} + \varphi_{rd}$ je z charakteristiky $\varphi_p = f(u_{pj})$ určen součet magnetomotorických napětí v rotoru u_{pj} . Magnetomotorické napětí budicího vinutí při zatížení v poměrných jednotkách a v ampérech pak je:

$$u_{mb} = f_{rd} + f_{ad} + u_{pj} = 2,17 \quad (3.79)$$

$$U_{mb} = u_{mb} U_m = 6518,7 \text{ A} \quad (3.80)$$

Pomocí znalosti magnetomotorického napětí budicího vinutí U_{mb} lze navrhnout jeho vlastnosti. Kvůli rezervě se získaná hodnota magnetomotorického napětí zvětšuje o 10 až 20 %. Je použito jednořadé budicí vinutí s čelem polokruhovitého tvaru. Průřez vodiče budicího vinutí se předběžně volí podle rovnice:

$$S_b = \frac{\rho_{Cu} \theta 2 p l_{zb} 1,2 U_{mb}}{U_b} = 37,4 \text{ mm}^2 \quad (3.81)$$

Budicí napětí U_b je nutné zvolit, pro navrhovaný stroj je použita hodnota 63 V. Střední délka závitu l_{zb} je pro jednořadé vinutí s polokruhovým čelem:

$$l_{zb} = 2(l_p - 2\delta'') + \pi(b_p + 2\Delta_p + b_b), \quad (3.82)$$

kde šířka pásu budicího vinutí je volena předběžně jako $b_b = 0,05$ až $0,1 \tau_p$, tedy $b_b = 0,06\tau_p = 0,014$ m.

Jednohranná tloušťka izolace jádra pólu $\Delta_p = 1,5$ mm a rozměr δ'' (viz Obr. 3.5) je určen podle Tabulky 3.8 v závislosti na šířce pólu.

Tab. 3.8: Rozměr δ'' [7]

b_p [m]	δ'' [m]
< 0,06	0,01
0,06 až 0,1	0,0125
0,1 až 0,12	0,015
0,12 až 0,15	0,02
0,15 až 0,20	0,03

Hustota proudu σ_b je volena předběžně jako $(3,5 \text{ až } 5,3) \cdot 10^6$ A m⁻². Budicí proud potom je:

$$I_b = S_b \sigma_b = 186,8 \text{ A} \quad (3.83)$$

Z hodnoty budicího proudu je poté stanoven počet závitů budicího vinutí N_b :

$$N_b = \frac{U_{mb}}{I_b} \approx 35 \quad (3.84)$$

Kratší rozměr vodiče budicího vinutí je předběžně určen podle vztahu:

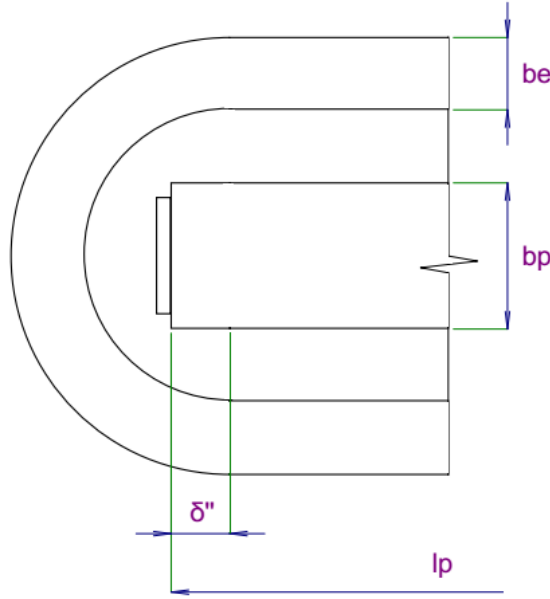
$$a_b = \frac{h_p - \Delta_{ip}}{N_b + 1} - \Delta_z = 3,5 \text{ mm}, \quad (3.85)$$

kde Δ_{ip} je tloušťka izolace vinutí od pólového nástavce a jha rotoru, hodnota $\Delta_{ip} = 10$ až 15 mm, Δ_z je tloušťka izolace mezi závity, $\Delta_z = 0,3$ mm.

Poté se ze známé hodnoty průřezu určí druhý rozměr vodiče:

$$b_b = \frac{S_b}{a_b} = 10,67 \text{ mm} \quad (3.86)$$

Přesné rozměry vodiče $a_b \times b_b$ se volí z hodnot podle Tabulky B.1, je tedy použit vodič o rozměrech $3,5 \times 11,2$ mm, průřez vodiče je 39,21 mm².



Obr. 3.7: Budicí vinutí s polokruhovým čelem [7]

3.3.7 Impedance rotorových vinutí

Odpory a reaktance rotorových vinutí jsou vypočteny v poměrných jednotkách. Reaktanci budicího vinutí je možné určit podle vztahu:

$$x_b = 1,27k_{ad}x_{ad} \left(1 + \frac{4k_f U_{m\delta} l_p' \lambda_\sigma}{\Phi} \right) = 1,621 \quad (3.87)$$

Rozptylová reaktance budicího vinutí pak je:

$$x_{\sigma b} = x_b - x_{ad} = 0,317 \quad (3.88)$$

Odpor budicího vinutí je dán rovnicí:

$$r_b = \frac{R_b}{zkZ_{vz}} = \frac{\rho_{Cu} 2p N_b l_{zb}}{S_b Z_{vz}} = 0,048 \quad (3.89)$$

Rozptylové reaktance tlumicího vinutí v podélné a příčné ose x_{td} a x_{tq} :

$$x_{td} = 7,9 \frac{U_{ma}}{\Phi} \frac{10^{-6}}{1 - k_t} \left[\frac{l_{pn}}{N_t} (\lambda_d + \lambda_{dif}) + \lambda_{Rd} \right] = 0,135 \quad (3.90a)$$

$$x_{tq} = 7,9 \frac{U_{ma}}{\Phi} \frac{10^{-6}}{1 + k_t} \left[\frac{l_{pn}}{N_t} (\lambda_d + \lambda_{dif}) + \lambda_{Rq} \right] = 0,058, \quad (3.90b)$$

kde činitelé magnetické vodivosti segmentu nakrátko $\lambda_{Rd} = 0,19\tau_p \cdot C_d/N_t, \lambda_{Rq} = 0,19\tau_p \cdot C_q/N_t$.⁵

⁵činitele C_d a C_q je možné určit podle Obr. A.12

Činitel rozlohy tlumicího vinutí $k_t = \frac{\alpha_t \sin N_t}{N_t \sin \alpha_t}$, kde $\alpha_t = \pi \cdot \tau_{dr} / \tau_p$.

Odpory tlumicího vinutí jsou dány vztahy:

$$r_{td} = \frac{2,16U_{ma}}{10^8 \Phi f} \frac{1}{1 - k_t} \left(\frac{c_t l_t}{S_t N_t} + \frac{c_k \tau_p C_d}{z k S k N_t} \right) = 0,043 \quad (3.91a)$$

$$r_{tq} = \frac{2,16U_{ma}}{10^8 \Phi f} \frac{1}{1 + k_t} \left(\frac{c_t l_t}{S_t N_t} + \frac{c_k \tau_p C_q}{S_k N_t} \right) = 0,019, \quad (3.91b)$$

kde činitele c_t a c_k vyjadřují poměr rezistivit materiálů tyče a kruhů nakrátko vůči mědi (pro měď se rovnají jedné, pro mosaz $c_t = c_k = 4$).

Pro zvýšení záběrného momentu motoru se používá náhrada několika měděných tyčí za mosazné, při výpočtu odporů je pak nutno mosazné tyče započítat.

Návrh pak pokračuje určením ztrát a účinnosti stroje a jeho úhlové charakteristiky (viz kapitoly 3.5 a 3.5.3).

3.4 Návrh PMSM

Návrh synchronního stroje s permanentními magnety po návrhu statoru vychází z [11].

Velikost vzduchové mezery stroje s permanentními magnety je možné stanovit podle rovnice (3.92):

$$\delta = \frac{0,18 + 0,006 P_N^{0,4}}{1000} = 1,3 \text{ mm} \quad (3.92)$$

Kvůli upevnění magnetů na povrchu rotoru a tloušťce bandáže je vhodné počítat při návrhu vzduchové mezery s určitou rezervou, její velikost je tedy navýšena o 0,5 mm, tedy $\delta = 1,8 \text{ mm}$.

Podle vypočítané velikosti vzduchové mezery je pak možné upravit ideální délku statoru:

$$l_i = l - n_{vk} \delta \frac{\left(\frac{b_{vk}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{vk}}{\delta}} + 2\delta = 345,5 \text{ mm} \quad (3.93)$$

Vnější průměr rotoru je:

$$D_r = D_s - 2\delta = 884,4 \text{ mm} \quad (3.94)$$

3.4.1 Návrh magnetů

Potřebná výška permanentních magnetů je vypočtena pomocí analýzy magnetického obvodu. Platí:

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mzs} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2} + U_{mPM} = H_c h_{PM}, \quad (3.95)$$

kde jednotlivá magnetická napětí je nutné určit pomocí magnetických indukcí v příslušných částech motoru.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře je:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau_p l_i} = 0,807 \text{ T}, \quad (3.96)$$

kde magnetický tok Φ je možné určit podle rovnice (3.43). Maximální hodnota indukce v zubu statoru B_{zs} je:

$$B_{zsmax} = \frac{B_\delta \tau_{ds} l_i}{(\tau_{ds} - b_{ds}) l_{Fe} k_{Fe}} \quad (3.97)$$

Skutečnou hodnotu magnetické indukce v zubech statoru lze určit numericky s počáteční podmínkou $B_{zs} = B_{zsmax}$ tak, aby platilo:

$$B_{zs} = B_{zsmax} - \left(\frac{l_i \tau_{ds}}{k_{Fe} l (\tau_{ds} - b_{ds})} - 1 \right) \mu_0 H_{zs}, \quad (3.98)$$

kde hodnotu intenzity magnetického pole H_{zs} lze pro danou hodnotu magnetické indukce určit z magnetizační charakteristiky použitého plechu (podle tabulky B.3). Pro navrhovaný motor je magnetická indukce v zubech statoru $B_{zs} = 1,545 \text{ T}$ s odpovídající intenzitou $H_{zs} = 2146,4 \text{ Am}^{-1}$.

Magnetická indukce ve jhu statoru je:

$$B_{js} = \frac{Fi}{2k_{Fe} l_i h_{js}} = 1,135 \text{ T}, \quad (3.99)$$

kde výška jha statoru $h_{js} = \frac{D_o - D_s}{2} - h_{ds} = 69,0 \text{ mm}$.

Odpovídající hodnota intenzity magnetického pole H_{js} je $152,6 \text{ Am}^{-1}$.

Magnetickou indukci ve jhu rotoru je možné volit $1,1\text{--}1,5 \text{ T}$ (podle [11]). Je použita hodnota indukce $B_{jr} = 1,3 \text{ T}$ s odpovídající hodnotou intenzity $H_{jr} = 269,5 \text{ Am}^{-1}$. Podle stanovené hodnoty magnetické indukce je určena výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{Fi}{2k_{Fe} l_i B_{jr}} = 55,1 \text{ mm} \quad (3.100)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře je možné určit jako:

$$U_{m\delta} = \frac{B_\delta \delta k_c}{\mu_0} = 1511,5 \text{ A}, \quad (3.101)$$

kde Carterův činitel k_c je:

$$k_c = \frac{\tau_{ds}}{\tau_{ds} - \frac{b_{ds}/\delta}{5 + b_{ds}/\delta} b_{ds}} \quad (3.102)$$

Magnetické napětí v zubu statoru:

$$U_{mzs} = \int_0^{h_{ds}} H dl = h_{ds} H_{zs} = 175,1 \text{ A} \quad (3.103)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru je:

$$U_{mjs} = c_s H_{js} l'_{js} = 20,1 \text{ A}, \quad (3.104)$$

kde střední délka indukční čáry ve jhu statoru je $l'_{js} = \frac{\pi(D_o - h_{js})}{2p}$,

koeficient c_s lze určit z obr. A.8 v závislosti na indukci B_{js} .

Magnetické napětí ve jhu rotoru je možné vyjádřit jako:

$$U_{mjr} = c_r H_{jr} \tau_{dr} = \frac{\pi}{2p} c_r H_{jr} (D_r - h_{jr}) - \frac{\pi}{p} c_r H_{jr} h_{PM}, \quad (3.105)$$

kde koeficient c_r je možné určit z obr. A.8 v závislosti na indukci B_{jr} .

Magnetické napětí v permanentních magnetech je:

$$U_{mPM} = \frac{H_c}{B_r} B_{PM} h_{PM}, \quad (3.106)$$

kde remanentní indukce B_r a koercitivní síla H_c jsou vlastnosti použitého materiálu permanentního magnetu, které lze zjistit z magnetizační křivky či hysterezní smyčky daného materiálu (viz Obr. 3.8). Pro navrhovaný motor je počítáno s magnety Nd-FeB 40UH ($B_r = 1,28 \text{ T}$ a $H_c = 995 \text{ kAm}^{-1}$). Magnetická indukce v permanentních magnetech je rovna magnetické indukci ve vzduchové mezeře $B_{PM} = B_\delta = 0,807 \text{ T}$.

Dosazením do rovnice (3.95) je možné vyjádřit výšku permanentních magnetů:

$$h_{PM} = \frac{U_{m\delta} + U_{mzs} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{\pi c_r H_{jr} (D_r - h_{jr})}{4p}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} B_{PM} + \frac{\pi c_r H_{jr}}{2p}} = 0,046 \text{ m} \doteq 5 \text{ mm} \quad (3.107)$$

Pak je možné dosazením do rovnic (3.105) a (3.106) určit magnetické napětí ve jhu rotoru a v permanentních magnetech:

$$U_{mjr} = \frac{\pi}{2p} c_r H_{jr} (D_r - h_{jr}) - \frac{\pi}{p} c_r H_{jr} h_{PM} = 19,1 \text{ A}$$

$$U_{mPM} = \frac{H_c}{B_r} B_{PM} h_{PM} = 3136,4 \text{ A}$$

Nakonec je možné vypočítat celkové magnetické napětí magnetického obvodu podle rovnice (3.95):

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mzs} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2} + U_{mPM} = 4842,6 \text{ T}$$

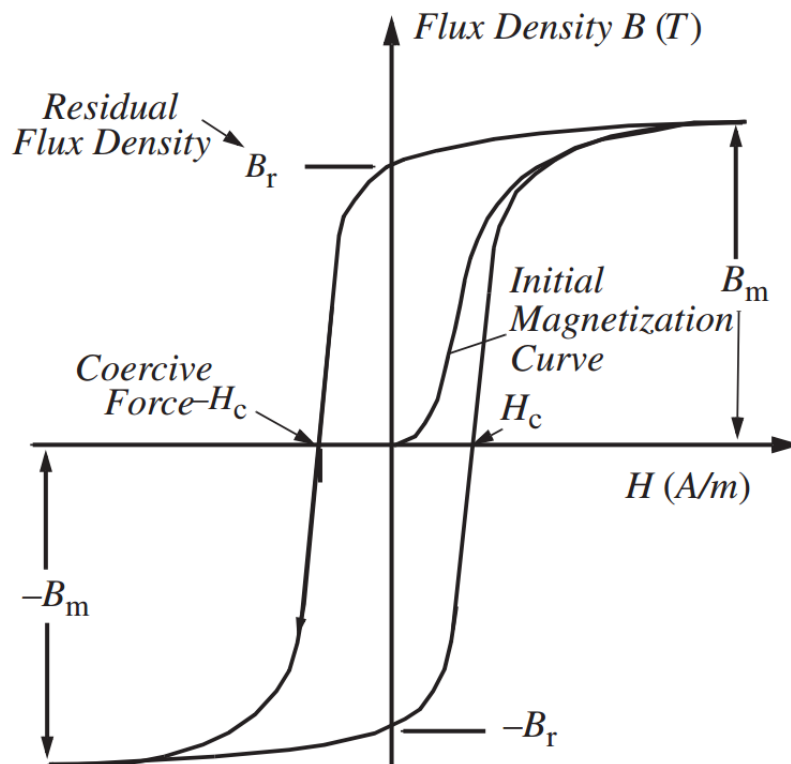
3.4.2 Výpočet zbývajících rozměrů rotoru

Po určení výšky permanentních magnetů je možné dopočítat chybějící rozměry rotoru. Průměr rotorového jha je:

$$D_j = D_r - 2h_{PM} = 874,4 \text{ mm} \quad (3.108)$$

Vnitřní průměr rotoru:

$$D_i = D_j - 2h_{jr} = 764,3 \text{ mm} \quad (3.109)$$



Obr. 3.8: Hysterezní smyčka permanentního magnetu[12]

3.4.3 Výpočet odporů a reaktancí PMSM

Odpor jedné fáze statorového vinutí je z (3.65):

$$R_s = \frac{\rho_{Cu\vartheta} N_s l_{zs}}{S_{ef} a} = 0,850 \, \Omega,$$

kde $\rho_{Cu\vartheta}$ je rezistivita vodiče při pracovní teplotě ϑ z (3.66), l_{zs} je délka závitů statorového vinutí (viz (3.67)).

Odpor statorového vinutí v poměrných jednotkách pak je:

$$r_s = R_s \frac{I_{Nf}}{U_{Nf}} = 0,0140 \text{ p.j.}$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statoru v ohmech a v p.j. z (3.69):

$$X_\sigma = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{N_s}{100} \right)^2 \frac{l_i}{pq_s} (\lambda_d + \lambda_c + \lambda_{dif}) = 9,308 \, \Omega$$

$$x_\sigma = X_\sigma \frac{I_{Nf}}{U_{Nf}} = 0,1533 \text{ p.j.},$$

kde činitele poměrné magnetické vodivosti λ_d , λ_c a λ_{dif} lze určit podle rovnic (3.70).

Magnetizační reaktance v podélné ose x_{md} v poměrných jednotkách lze určit podle vztahů (3.72) a (3.73):

$$x_{md} = \frac{k_{ad}U_{ma}}{k_f U_{m\delta}} = 0,4515 \text{ p.j.} \quad (3.110)$$

$$x_{mq} = \frac{k_{aq}U_{ma}}{k_f U_{m\delta}} \frac{1 + k_c}{2} = 0,2987 \text{ p.j.} \quad (3.111)$$

Podélnou a příčnou synchronní reaktanci pak je možné určit obdobně jako u stroje s budícím vinutím:

$$x_d = x_{md} + x_\sigma = 0,6048 \text{ p.j.}$$

$$x_q = x_{mq} + x_\sigma = 0,4520 \text{ p.j.}$$

3.5 Výpočet technických ukazatelů stroje

Po dokončení návrhu stroje je nutné odhadnout základní technické ukazatele stroje, zejména hmotnosti jednotlivých částí, ztráty a účinnost stroje.

3.5.1 Hmotnost aktivních částí stroje

Hmotnosti aktivních částí stroje jsou důležité pro určení ztrát a účinnosti stroje, zároveň pak hmotnosti spotřebovaného aktivního železa a mědi stroje ovlivňují jeho výslednou cenu. Celkovou hmotnost stroje je pak možné určit po konstrukčním zpracování.

Hmotnost satorového svazku m_s se skládá z hmotností jha statoru a zubů statoru. Hmotnost satorových zubů m_{zs} lze určit podle vzorce:

$$m_{zs} = \rho_{Fe} l_{Fe} k_{Fe} h_{ds} Q_s \left[\frac{\pi (D_s + h_{ds})}{Q_s} - b_{ds} \right] \quad (3.112)$$

Hustota použitého typu oceli ρ_{Fe} je 7700 kg m^{-3} .

Hmotnost jha statoru je:

$$m_{js} = \rho_{Fe} l_{Fe} k_{Fe} h_{js} \pi (D_s - h_{js}) \quad (3.113)$$

Hmotnost satorového vinutí je:

$$m_{vs} = \rho_{Cu} S_{ef} N_{ef} Q_s l_{zs} / 2, \quad (3.114)$$

kde $\rho_{Cu} = 8900 \text{ kg m}^{-3}$ je hustota mědi.

Hmotnost svazku rotorového jha m_r lze určit podle vzorce:

$$m_{jr} = k_{Fe} \rho_{Fe} l_{jr} \pi \frac{D_j^2 - D_i^2}{4} \quad (3.115)$$

Pro motor s budicím vinutím je navíc možné vypočítat ještě hmotnost pólů, budicího vinutí a tlumicího vinutí. Hmotnost pólů pak je:

$$m_p = \rho_{Fe} l_p' k_{Fe} 2p (h_p b_p + 0,8 h_{pn} b_{pn}) \quad (3.116)$$

Hmotnost budicího vinutí se určí podle vztahu:

$$m_b = \rho_{Cu} S_b l_{zb} 2p N_b \quad (3.117)$$

Hmotnost tlumicího vinutí m_r se skládá z hmotnosti tyčí m_t a hmotnosti segmentu nakrátko m_{seg} :

$$m_r = m_t + m_{seg} \quad (3.118a)$$

$$m_t = \rho_{Cu} S_t 2p l_t N_t \quad (3.118b)$$

$$m_{seg} = \rho_{Cu} S_k 2\pi (D_s - 2\delta - 2h_{dr} - 2d_d) \quad (3.118c)$$

Pro PMSM je možné stanovit ještě hmotnost permanentních magnetů m_{PM} jako:

$$m_{PM} = \frac{D_j + D_i}{2} \pi \alpha l_{Fe} h_{PM} \rho_{PM}, \quad (3.119)$$

kde hustota materiálu permanentních magnetů ρ_{PM} je pro NdFeB magnety 7500 kg m^{-3} .

Porovnání hmotností motoru s budicím vinutím a s PM se vstupními parametry podle tabulky 3.1:

Tab. 3.9: Porovnání hmotností navržených motorů

Hmotnosti motoru:	S budicím vinutím	PMSM
Svazek statoru m_s	881 kg	881 kg
Vinutí statoru m_{vs}	244 kg	244 kg
Jho rotoru m_{jr}	278 kg	331 kg
Póly rotoru m_p	770 kg	-
Tlumicí vinutí m_r	60 kg	-
Budicí vinutí m_b	163 kg	-
Permanentní magnety m_{PM}	-	24 kg
Celková hmotnost	2395 kg	1480 kg

3.5.2 Ztráty a účinnost motoru

Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí lze určit podle vzorce:

$$\Delta P_{js} = 3 R_s I_{Nf}^2 \quad (3.120)$$

Magnetické ztráty v železe jsou součtem ztrát ve jhu a v zubech statoru:

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta P_{\text{Fej}} + \Delta P_{\text{Fez}} \quad (3.121a)$$

$$\Delta P_{\text{Fej}} = 1,3 \Delta p_{1,0} B_{\text{js}}^2 m_{\text{js}} \quad (3.121b)$$

$$\Delta P_{\text{Fez}} = 1,7 \Delta p_{1,0} B_{\text{zs}}^2 m_{\text{zs}}, \quad (3.121c)$$

kde $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty při magnetické indukci 1 T (a frekvenci 50 Hz), pro použité plechy M400-50A se $\Delta p_{1,0} = 2$.

Mechanické ztráty jsou součtem ztrát ventilačních a ztrát třením v ložiskách, je možné je přibližně určit jako:

$$\Delta P_{\text{mech}} \approx 3,68 p \sqrt{l} \left(\frac{v}{40} \right)^3, \quad (3.122)$$

kde obvodová rychlost rotoru $v = \frac{\pi n D_r}{60}$.

Dodatečné ztráty naprázdno vznikají kolísáním indukce, způsobeným vlivem drážkování statoru, lze je spočítat jako:

$$\Delta P_{\delta p} = 4,6 p \alpha \tau_p l \left(\frac{Q_s n}{10000} \right)^{1,5} [\tau_{\text{ds}} B_{\delta} (k_c - 1)] \quad (3.123)$$

Dodatečné ztráty při zatížení ΔP_d je možné přibližně stanovit jako 0,5 % z příkonu motoru.

Pro motor s budicím vinutím je nutné určit navíc Jouleovy ztráty v budicím vinutí, které je možné spočítat jako:

$$\Delta P_b = R_b I_b^2 + 2 \Delta U_k I_b, \quad (3.124)$$

kde ΔU_k je úbytek napětí na kartáčích budiče.

Celkové ztráty při jmenovitém zatížení jsou tedy:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{js}} + \Delta P_{\text{Fej}} + \Delta P_{\text{Fez}} + \Delta P_{\text{mech}} + \Delta P_{\delta p} + \Delta P_d (+\Delta P_b) \quad (3.125)$$

Účinnost motoru je možné určit podle vzorce:

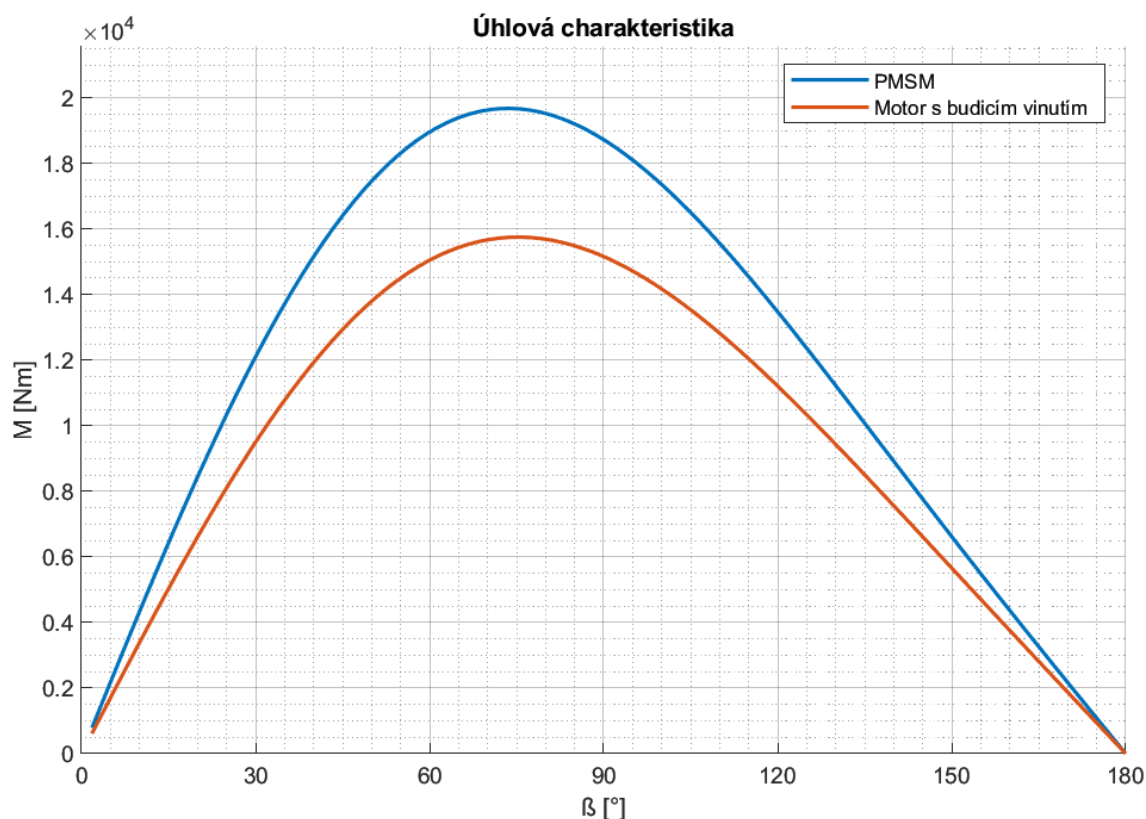
$$\eta = \frac{P_N}{P_N + \Delta P} \cdot 100 \% \quad (3.126)$$

3.5.3 Úhlová charakteristika

Úhlová charakteristika je závislost momentu nebo výkonu na zatěžovacím úhlu motoru, tedy $M = f(\beta)$ nebo $P_N = f(\beta)$. Z této charakteristiky se potom určuje maximální moment a výkon stroje, případně jeho statická přetížitelnost M_{max}/M_N , která by neměla být menší než 1,5. Charakteristiku je možné získat jako funkci:

$$M(\beta) = \frac{3p}{2\pi f} \left[\frac{U_i U_{\text{Nf}}}{x_d Z_{\text{vz}}} \sin(\beta) + \frac{U_{\text{Nf}}^2}{2} \left(\frac{1}{x_q Z_{\text{vz}}} - \frac{1}{x_d Z_{\text{vz}}} \right) \sin(2\beta) \right] \quad (3.127)$$

Dosazováním hodnot zátěžného úhlu od 0 do π je pak možné vykreslit graf úhlové charakteristiky a pro úhel $\beta = \pi/2$ spočítat maximální moment. Pro navrhovaný motor s budícím vinutím a PMSM je úhlová charakteristika na Obr. 3.9.



Obr. 3.9: Úhlové charakteristiky navržených motorů

3.6 Porovnání motorů

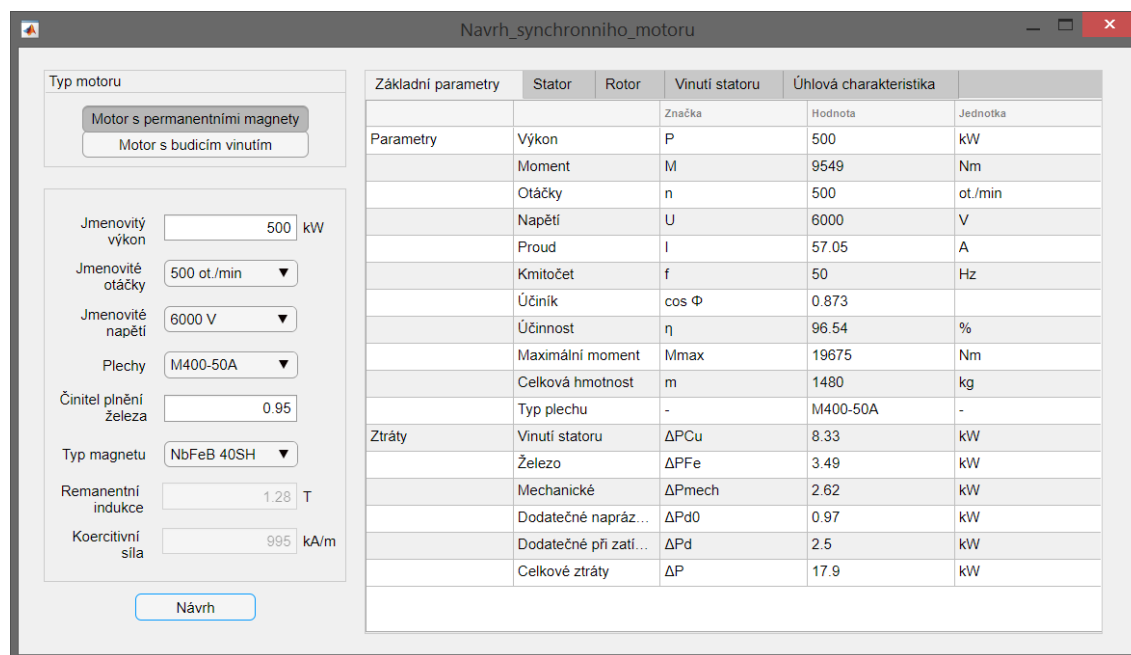
V tabulce 3.10 je porovnání parametrů motorů s budícím vinutím a s permanentními magnety navržených programem ze vstupních hodnot podle tabulky 3.1. Z tabulky je patrné, že parametry statoru a jeho vinutí jsou u obou motorů stejné, protože jsou navrženy pomocí stejného algoritmu. U PMSM byla navržena menší vzduchová mezera, proto se vnější průměry rotorů obou strojů mírně liší. U motoru s budícím vinutím byla také navržena mnohem větší výška rotorového jha. Kvůli menší výšce rotorového jha a také absenci budícího a tlumícího vinutí je rotor PMSM znatelně lehčí. Vzhledem ke stejným výkonům a otáčkám obou motorů jsou jejich jmenovité momenty stejné, podobné jsou také proudy ve vinutí statoru a účinník. Liší se ale jejich maximální momenty, většího maximálního momentu dosahuje motor s permanentními magnety. Jelikož u PMSM odpadají dost významné ztráty v budícím vinutí, je větší jeho výsledná účinnost.

Parametr motoru	S budicím vinutím	PMSM
Stator		
Vnější průměr D_o	1180 mm	1180 mm
Vnitřní průměr D_s	888 mm	888 mm
Délka paketů l_{pa}	6x44,8 mm	6x44,8 mm
Délka kanálu b_{vk}	10 mm	10 mm
Celková délka l	373,3 mm	373,3 mm
Počet drážek Q_s	90	90
Drážek na pól a fázi q_s	2,5	2,5
Šířka drážky b_{ds}	12,22 mm	12,22 mm
Výška drážky h_{ds}	81,6 mm	81,6 mm
Paralelní větve vinutí a	2	2
Vodičů v drážce N_{ef}	48	48
Činitel vinutí k_{vs}	0,91	0,91
Hmotnost statoru m_s	1125 kg	1125 kg
Rotor		
Vnější průměr D_r	882 mm	884 mm
Vnitřní průměr D_i	451 mm	762 mm
Vzduchová mezera δ	3,08 mm	1,82 mm
Pólová rozteč τ_p	232,5 mm	232,5 mm
Hmotnost rotoru m_{jr}	1271 kg	355 kg
Základní parametry a ztráty		
Proud I_{Nf}	56,48 A	57,05 A
Účinit $\cos \varphi$	0,9	0,873
Moment M_N	9 549 Nm	9 549 Nm
Maximální moment M_{max}	15 750 Nm	19 675 Nm
Mechanické ztráty ΔP_{mech}	2,65 kW	2,62 kW
Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{js}	8,33 kW	8,33 kW
Ztráty v budicím vinutí ΔP_b	9,83 kW	-
Ztráty v železe ΔP_{Fe}	3,53 kW	3,49 kW
Dodatečné naprázdno $\Delta P_{\delta p}$	1,28 kW	0,97 kW
Dodatečné při zatížení ΔP_d	2,67 kW	2,5 kW
Celková hmotnost $\sum m$	2395 kg	1480 kg
Celkové ztráty ΔP	28,3 kW	17,9 kW
Výsledná účinnost η	94,65 %	96,54 %

Tab. 3.10: Porovnání obou typů motorů

4 Vytvořený program

Podle algoritmu návrhu popsaném v předchozí kapitole byl vytvořen program pro automatický elektromagnetický návrh synchronního motoru ze zadaných parametrů. Program byl vytvořen v programovacím prostředí Matlab formou aplikace, spustitelné pouze v programu Matlab.



Obr. 4.1: Uživatelské rozhraní vytvořeného programu

4.1 Popis funkce programu

V programu je možné vybrat typ motoru, tedy buď PMSM nebo motor s budičím vinutím. Pro navrhovaný motor se počítá s třífázovým vinutím zapojeným do hvězdy a frekvencí napájecího napětí $f = 50$ Hz. Výkon motoru P_N je možné nastavit mezi 400 a 5 000 kW, otáčky motoru n odpovídají počtům pólových dvojic $p = 2-8$ (tedy otáčky $n = 375-1500 \text{ min}^{-1}$). Hodnotu jmenovitého napětí U_N lze volit 400 V, 6 kV nebo 10 kV. Dále je možné zvolit typ použitého plechu (a tím jemu odpovídající magnetizační charakteristiku a hustotu) a činitel plnění železa k_{Fe} . V programu jsou definované plechy M400-50A, M600-50A a M800-50A.

Pro PMSM je dále možné zvolit typ permanentního magnetu s odpovídající remanentní indukci B_r a koercitivní silou H_c , případně je zde možnost „Vlastní magnet“, která uživateli umožní zadání vlastních hodnot B_r a H_c . V programu jsou definované

Navrh_synchronního_motoru

Typ motoru

Motor s permanentními magnety

Motor s budicím vinutím

Jmenovitý výkon: 500 kW

Jmenovitě otáčky: 500 ot./min

Jmenovitě napětí: 6000 V

Plech: M400-50A

Činitel plnění železa: 0.95

Momentová přetížitelnost: 2.2

Návrh

Základní parametry	Stator	Rotor	Vinutí statoru	Vinutí rotoru	Úhlová charakteristika
Parametry	Výkon		Značka	Hodnota	Jednotka
	P			500	kW
	Moment		M	9549	Nm
	Otáčky		n	500	ot./min
	Napětí		U	6000	V
	Proud		I	56.48	A
	Kmitočet		f	50	Hz
	Účinník		cos Φ	0.9	
	Účinnost		η	94.65	%
	Maximální moment		Mmax	15750	Nm
	Celková hmotnost		m	2395	kg
	Typ plechu		-	M400-50A	-
Ztráty	Vinutí statoru		ΔPCu	8.33	kW
	Budicí vinutí		ΔPb	9.83	kW
	Železo		ΔPFe	3.53	kW
	Mechanické		ΔPmech	2.65	kW
	Dodatečné napráz...		ΔPd0	1.28	kW
	Dodatečné při zatí...		ΔPd	2.67	kW
	Celkové ztráty		ΔP	28.3	kW

Obr. 4.2: Okno programu pro návrh motoru s budicím vinutím

magnety typu NdFeB 40SH a NdFeB 40UH. Pro motor s budicím vinutím je dále možné volit hodnotu momentové přetížitelnosti, která může být mezi 1,7 a 2,5.

Po stisknutí tlačítka „Návrh“ je spuštěn algoritmus návrhu motoru podle zadáných parametrů. Po proběhnutí algoritmu jsou výsledky vloženy do panelu s tabulkami na pravé straně uživatelského rozhraní, kde je také vykreslena úhlová charakteristika navrženého motoru (viz Obr. 4.3–4.7).

Základní parametry	Stator	Rotor	Vinutí statoru	Úhlová charakteristika
	Značka		Hodnota	Jednotka
Vnější průměr	De		1180	mm
Vnitřní průměr	Ds		888.1	mm
Délka paketu	lpa		44.8	mm
Počet kanálů	nvk		6	
Šířka kanálu	bvk		10	mm
Celková délka	ls		373.3	mm
Vzduchová mezera	δ		1.82	mm
Počet drážek	Qs		90	mm
Šířka drážky	bd		12.32	mm
Výška drážky	hd		76.96	mm
Hmotnost svazku	ms		891	kg

Obr. 4.3: Zobrazení parametrů statoru navrženého motoru v programu

Základní parametry	Stator	Rotor	Vinutí statoru	Úhlová charakteristika	
	Značka		Hodnota	Jednotka	
Vnější průměr	Dr		884.4	mm	
Vnitřní průměr	Di		762	mm	
Vnější průměr jha	Dj		874.4	mm	
Hmotnost jha	mjr		331	kg	
Počet pólů	2p		12		
Pólová rozteč	tp		232.5	mm	
Typ magnetu			NbFeB 40SH		
Pólové krytí	α		0.8		
Výška magnetu	hPM		5	mm	
Hmotnost magnetů	mPM		24	kg	

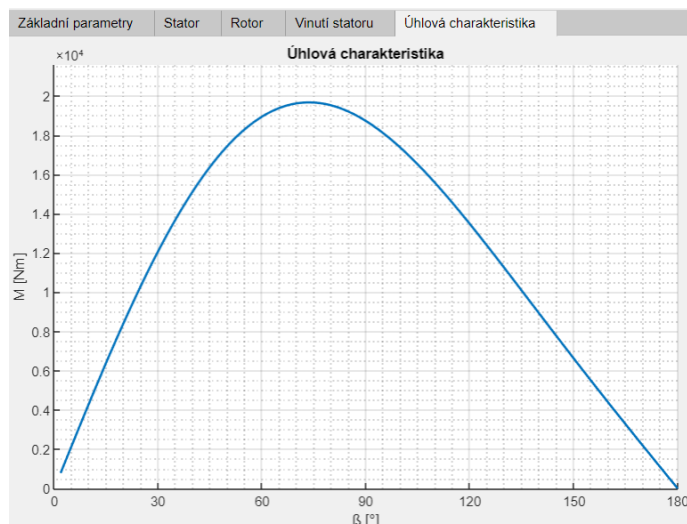
Obr. 4.4: Zobrazení parametrů rotoru navrženého motoru v programu

Základní parametry	Stator	Rotor	Vinutí statoru	Úhlová charakteristika	
	Značka		Hodnota	Jednotka	
Počet paralelních větví	a		2		
Vodičů fáze v sérii	N		360		
Vodičů v drážce	Vd		48		
Krok cívk	y		6		
Činitel vinutí	kv		0.91		
Rozměry vodiče	hv		1.32	mm	
	bv		8.32	mm	
Délka závitů	lz		1617.39	mm	
Odpor vinutí	R1		0.847	Ω	
Rozptylová reaktance	$X\sigma$		8.966	Ω	
Podélná synchronní rea...	X_d		36.364	Ω	
Příčná synchronní reakt...	X_q		27.127	Ω	
Hmotnost vinutí	mCu		242	kg	

Obr. 4.5: Zobrazení parametrů statorového vinutí navrženého motoru v programu

Základní parametry	Stator	Rotor	Vinutí statoru	Úhlová charakteristika	
	Značka		Hodnota	Jednotka	
Počet paralelních větví	a		2		
Vodičů fáze v sérii	N		360		
Vodičů v drážce	Vd		48		
Krok cívk	y		6		
Činitel vinutí	kv		0.91		
Rozměry vodiče	hv		1.32	mm	
	bv		8.32	mm	
Délka závitů	lz		1617.39	mm	
Odpor vinutí	R1		0.847	Ω	
Rozptylová reaktance	$X\sigma$		8.966	Ω	
Podélná synchronní rea...	X_d		36.364	Ω	
Příčná synchronní reakt...	X_q		27.127	Ω	
Hmotnost vinutí	mCu		242	kg	

Obr. 4.6: Zobrazení parametrů rotorových vinutí motoru s budicím vinutím



Obr. 4.7: Zobrazení úhlové charakteristiky navrženého motoru v programu

4.2 Porovnání funkce programu

Aby byla vyzkoušena funkce programu, byl vybrán vyráběný motor, se kterým je možné porovnat motor navržený programem. Jedná se o osmipólový PMSM s výkonem 1,6 MW na napětí 6 000 V. Tento motor byl vybrán, protože typově odpovídá motoru navrhovanému programem. Parametry tohoto motoru jsou v tabulce C.1. Parametry motoru navrženého programem při zadání odpovídajících vstupních hodnot jsou v tabulce C.2. Údaje o tomto motoru byly poskytnuty společností, která si nepřeje být v práci jmenována.

Motor navržený programem má větší průměr statoru $D_o = 1430$ mm i rotoru $D_r = 975,4$ mm (oproti porovnávanému stroji, kde $D_o = 1230$ mm a $D_r = 774$ mm). Zároveň má ale motor navržený programem menší osovou délku $l = 529$ mm (zatímco u porovnávaného motoru $l = 890$ mm), takže celkově je navržený motor menší a lehčí než porovnávaný motor (3834 kg oproti 5607,5 kg). S menší hmotností statorového svazku souvisí také menší ztráty v železe statoru. S větším průměrem rotoru souvisí větší obvodová rychlost a tím i větší odhadnuté mechanické ztráty v motoru, takže celkové ztráty motoru navrženého programem jsou srovnatelné s porovnávaným motorem. To znamená, že výsledná účinnost obou motorů je také přibližně stejná, a to $\eta \doteq 97,5\%$. Motor navržený programem má menší proud statorovým vinutím (a tedy pravděpodobně lepší účinník, který u porovnávaného motoru není přesně uveden). U motoru navrženého programem je jmenovitý fázový proud statorovým vinutím 178,2 A, u porovnávaného motoru je to 190 A. Motor navržený programem dosahuje maximálního momentu 33 399 Nm, zatímco u porovnávaného motoru je uvedeno jen 24 500 Nm).

Navrh_synchronního_motoru

Typ motoru

Motor s permanentními magnety

Motor s buďícím vinutím

Jmenovitý výkon: 1600 kW

Jmenovitá otáčky: 750 ot./min

Jmenovité napětí: 6000 V

Plechý: M400-50A

Činitel plnění železa: 0.95

Typ magnetu: NbFeB 40SH

Remanentní indukce: 1.28 T

Koercitivní síla: 995 kA/m

Návrh

Základní parametry		Stator	Rotor	Vinutí statoru	Úhlová charakteristika
Parametry	Výkon	P	1600		kW
	Moment	M	20372		Nm
	Otáčky	n	750		ot./min
	Napětí	U	6000		V
	Proud	I	178.19		A
	Kmitočet	f	50		Hz
	Účinnost	cos Φ	0.886		
	Účinnost	η	97.5		%
	Maximální moment	Mmax	33699		Nm
	Celková hmotnost	m	3740		kg
	Typ plechu	-	M400-50A		-
Ztráty	Vinutí statoru	ΔPCu	14.82		kW
	Železo	ΔPFe	6.06		kW
	Mechanické	ΔPCu	9.4		kW
	Dodatečné napráz...	ΔPd0	2.94		kW
	Dodatečné při zati...	ΔPd	8		kW
	Celkové ztráty	ΔP	41.2		kW

Obr. 4.8: Návrh 1,6 MW motoru pomocí programu

Stator PMSM navrženého programem má menší počet drážek (84 vs. 108), zato je zde větší počet vodičů na drážku ($N_{ef}=42$, zatímco porovnávaný motor má $N_{ef}=26$), a tím i větší drážky ($14,82 \times 90,34$ mm oproti $11,5 \times 85,5$ mm). To znamená větší délku závitu vinutí, zároveň ale mají jeho vodiče větší průřez, výsledný odpor vinutí je menší než u porovnávaného motoru. Kvůli menšímu odporu i proudu jsou menší také ztráty ve vinutí motoru. Navržený motor používá také menší výšku permanentních magnetů – $h_{PM}=7$ mm (u porovnávaného motoru je to 10 mm).

Závěr

Práce se zabývala návrhem synchronního motoru s budičím vinutím a s permanentními magnety a automatizováním tohoto návrhu. V první kapitole práce je popsán obecný princip funkce synchronního motoru a jeho konstrukce.

Druhá kapitola se zabývá postupem návrhu motoru, zároveň je v ní proveden analytický výpočet motoru se zadanými parametry podle [7] a [11]. Pro oba typy motorů jsou stejným algoritmem navrženy hlavní rozměry motoru, drážky statoru a statorové vinutí. Další postup je pak pro oba typy motoru podobný. Po návrhu statoru je navržena vzduchová mezera a rozměry rotoru, poté následuje magnetický výpočet, pomocí kterého je navrženo budičí vinutí či výška permanentních magnetů. Dále jsou vypočteny odpory a reaktance motoru a odhadnuty ztráty a účinnost. Nakonec je vypočtena úhlová charakteristika motoru. Pro motor s budičím vinutím je před provedením magnetického výpočtu ještě navrženo tlumivé vinutí.

Z porovnání obou typů motorů v části 3.6 je zřejmé, že u motoru s PM je při stejných vstupních parametrech dosaženo o něco vyšší účinnosti než u motoru s budičím vinutím, zároveň je tento motor lehčí a dosahuje většího maximálního momentu (viz úhlové charakteristiky na obr. 3.9). Vzhledem ke stejnému algoritmu návrhu základních rozměrů motorů plyne jejich stejná velikost.

Poslední část práce se zabývala popisem a funkcí vytvořeného programu, který slouží k automatizovanému návrhu synchronního motoru. Motor navrženy pomocí vytvořeného programu byl pak porovnán s vyráběným motorem se stejnými parametry. Ze srovnání je zřejmé, že část parametrů, zejména hlavní rozměry motoru a parametry vinutí, se liší, ale výsledné technické ukazatele obou motorů jsou dost podobné. Odchylna může být způsobena zejména volbou některých parametrů a také odlišným algoritmem návrhu motoru.

Pro další ověření funkce programu by bylo nutné zejména provést elektromagnetickou simulaci některého programově navrženo motoru metodou konečných prvků (například pomocí programu ANSYS). Dalším způsobem ověření funkce programu by bylo také provedení tepelných a mechanických výpočtů. Konečné ověření funkce programu by pak bylo možné jedině měřením na skutečném motoru, vyrobeném podle návrhu programem.

Program by bylo možné dále vylepšit například přidáním dalších typů permanentních magnetů či plechů, případně možností definování si vlastního typu plechu skrz jeho magnetizační charakteristiku. Dalším vylepšením by mohla být také možnost exportu dat nebo možnost volby tvaru drážek a typu použité izolace.

Literatura

- [1] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK, 1968. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] KARUNAMOORTHY, B. a D. DHIVYAA. Design of PMSM and its application. *International Journal of Current Research* [online]. 2017, 09(05) [cit. 2020-05-04]. ISSN 0975-833X. Dostupné z: <http://www.journalcra.com>
- [3] NOVÁK, Jaroslav. *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část)*. Elektro. FCC Public, 2006, **2006**(06). ISSN 1210-0889.
- [4] THERAJA, B. L. a A. K. THERAJA. *A Textbook of Electrical Technology in S.I Units Vol. 2: AC and DC Machines*. S.Chand & Company, 2006. ISBN 978-8121924375.
- [5] CHAPMAN, Stephen J. *Electric machinery fundamentals*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, c2005. ISBN 00-724-6523-9.
- [6] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje*. 2., upr. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1970. Edícia elektrotechnickej literatúry (Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry).
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [8] MEŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2109-2.
- [9] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2003. ISBN 00-711-2193-5.
- [10] SAWHNEY, A.K. *A Course in Electrical Machine Design*. 4. vydání. New Delhi:Dhanpat Rai, 1984. ISBN 978-8177001013.
- [11] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-111-8581-575.
- [12] LIPO, Thomas A. IEEE PRESS. *Introduction to AC Machine Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-1-119-35216-7.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

PM	Permanentní magnety
PMSM	Synchronní stroj s permanentními magnety (Permanent Magnet Synchronnous Machine)
β	zátěžný úhel (rad)
M	moment (Nm)
M_N	jmenovitý moment motoru (Nm)
M_{\max}	maximální moment motoru (Nm)
m_{\max}	momentová přetížitelnost (-)
P	výkon (W)
P_N	jmenovitý výkon motoru (kW)
P_i	vnitřní elektromagnetický výkon (kW)
η	účinnost motoru (%)
m	počet fází statorového vinutí (-)
a	počet paralelních větví statorového vinutí (-)
f	jmenovitá frekvence napájecího napětí (Hz)
n	jmenovité otáčky motoru (min^{-1})
p	počet pólových dvojic (-)
v	obvodová rychlost motoru (m s^{-1})
U_N	jmenovité napětí na statorovém vinutí (V)
U_b	napětí na budicím vinutí (V)
U_i	indukované napětí (V)
U_{Nf}	jmenovité fázové napětí na statorovém vinutí (V)
I_b	proud budicím vinutím (A)
I_{Nf}	jmenovitý fázový proud (A)
σ_b	hustota proudu v budicím vinutí (Am^{-2})
σ_s	proudová hustota ve statorovém vinutí (Am^{-2})
A	lineární hustota proudu (Am^{-1})
$\cos \varphi$	jmenovitý účiník motoru (-)
α	pólové krytí (-)
α_δ	výpočtový činitel pólového krytí (-)
a_b	výška vodiče budicího vinutí (m)
b_b	šířka vodiče budicího vinutí (m)
b_{dr}	šířka krčku drážky rotoru (m)
b_{ds}	šířka statorové drážky (m)
b_p	šířka jádra pólu (m)
b_{pn}	šířka pólového nástavce (m)

b_{vk}	šířka ventilačního kanálu (m)
b_v	šířka vodiče statorového vinutí bez izolace (m)
b_{vi}	šířka izolovaného vodiče statorového vinutí (m)
d_d	průměr drážky rotoru (m)
d_t	průměr tyče rozběhového vinutí (m)
D_i	vnitřní průměr rotoru (m)
D_j	průměr jha rotoru (m)
D_o	vnější průměr statoru (m)
D_r	vnější průměr rotoru (m)
D_s	vnitřní průměr statoru (m)
δ	velikost vzduchové mezery v ose pólu (m)
δ_{\max}	maximální velikost vzduchové mezery (m)
δ'	střední velikost vzduchové mezery (m)
Δ_{id}	dvoustranná izolace statorové drážky (m)
Δ_p	tloušťka jednostranné izolace jádra pólu (m)
h_{dr}	výška krčku drážky rotoru (m)
h_{ds}	hloubka statorové drážky (m)
h_{jr}	výška rotorového jha (m)
h_{js}	výška jha statoru (m)
h_k	výška klínové části drážky (m)
h_p	výška jádra pólu (m)
h_{pn}	výška pólového nástavce (m)
h_{PM}	výška permanentních magnetů (m)
h_v	výška vodiče statorového vinutí bez izolace (m)
h_{vi}	výška izolovaného vodiče statorového vinutí (m)
l_i	ideální délka statoru (m)
l	délka statoru (m)
l_{Fe}	celková délka železa statoru (m)
l_{pa}	délka statorového paketu (m)
l_{pn}	délka pólového nástavce (m)
l_p	délka pólu (m)
l'_p	výpočtová osová délka jádra pólu (m)
l_{jr}	délka rotorového jha (m)
l_t	délka tyče rozběhového vinutí (m)
l'_{jr}	délka indukční čáry v rotorovém jhu (m)
l'_{js}	střední délka indukční čáry ve statorovém jhu (m)
l_{zs}	délka závitu statorového vinutí (Ω)
l_{zb}	střední délka závitu budicího vinutí (m)
R_p	poloměr zakřivení pólového nástavce (m)

τ_{ds}	drážková rozteč statoru (m)
τ_{dr}	drážková rozteč rotoru (m)
τ_p	pólová rozteč (m)
S_b	průřez vodiče budicího vinutí (m ²)
S_{ef}	efektivní průřez drážky statoru (m ²)
S_k	průřez segmentu nakrátko rozběhového vinutí (m ²)
S_t	průřez tyče rozběhového vinutí (m ²)
N_b	počet závitů budicího vinutí (-)
N_{ef}	počet efektivních vodičů v drážce statoru (-)
n_s	počet dílčích vodičů na šířku drážky (-)
N_s	počet závitů ve fázi statorového vinutí (-)
N_t	počet tyčí rozběhového vinutí na pól (-)
n_v	počet dílčích vodičů na výšku drážky v jedné vrstvě vinutí (-)
n_{vk}	počet ventilačních kanálů (-)
Q_p	pólová rozteč v počtu drážek (-)
Q_s	počet drážek statoru (-)
q_s	počet drážek statoru na pól a fázi (-)
y	krok statorového vinutí (-)
B_δ	magnetická indukce ve vzduchové mezeře (T)
B_{jr}	indukce ve jhu rotoru (T)
B_{js}	magnetická indukce ve jhu statoru (T)
B_p	magnetická indukce v pólu (T)
B_{PM}	magnetická indukce v permanentním magnetu (T)
B_r	remanentní indukce magnetu (T)
B_{zr}	magnetická indukce v zubech rotoru (T)
B_{zs}	magnetická indukce v zubech statoru (T)
H_c	koercitivní síla permanentních magnetů (Am ⁻¹)
H_{jr}	intenzita magnetického pole ve jhu rotoru (Am ⁻¹)
H_{js}	intenzita magnetického pole ve jhu statoru (Am ⁻¹)
H_p	intenzita magnetického pole v pólech (Am ⁻¹)
H_{zr}	intenzita magnetického pole v zubech rotoru (Am ⁻¹)
H_{zs}	intenzita magnetického pole v zubech statoru (Am ⁻¹)
U_m	magnetomotorické napětí (A)
U_{ma}	magnetomotorické napětí reakce kotvy (A)
U_{mb}	magnetomotorické napětí budicího vinutí (A)
$U_{m\delta}$	magnetické napětí ve vzduchové mezeře (A)
U_{mjr}	magnetické napětí ve jhu rotoru (A)
U_{mjs}	magnetické napětí ve jhu statoru (A)
U_{mp}	magnetické napětí v pólech (A)

$U_{\mathbf{m}\delta\mathbf{p}}$	magnetické napětí styku mezi pólem a jhem rotoru (A)
$U_{\mathbf{mPM}}$	magnetické napětí v permanentních magnetech (A)
$U_{\mathbf{mzr}}$	magnetické napětí v zubech rotoru (A)
$U_{\mathbf{mzs}}$	magnetické napětí v zubech statoru (A)
Φ	magnetický tok (Wb)
Φ_{σ}	rozptylový magnetický tok (Wb)
μ_0	permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg m A}^{-2} \text{ s}^{-2}$
ΔP	celkové ztráty (W)
$\Delta P_{\mathbf{b}}$	ztráty v budicím vinutí (W)
$\Delta P_{\mathbf{js}}$	ztráty ve statorovém vinutí (W)
$\Delta P_{\mathbf{d}}$	dodatečné ztráty při zatížení (W)
$\Delta P_{\mathbf{Fe}}$	magnetické ztráty v železe (W)
$\Delta P_{\mathbf{Fej}}$	ztráty v železe jha statoru (W)
$\Delta P_{\mathbf{Fez}}$	ztráty v železe zubů statoru (W)
$\Delta P_{\mathbf{mech}}$	mechanické ztráty (W)
$\Delta P_{\delta\mathbf{p}}$	dodatečné ztráty naprázdno (W)
$\Delta p_{1,0}$	měrné ztráty v železe při indukci 1 T a frekvenci 50 Hz (W kg^{-1})
$m_{\mathbf{b}}$	hmotnost budicího vinutí (kg)
$m_{\mathbf{j}\mathbf{r}}$	hmotnost jha rotoru (kg)
$m_{\mathbf{j}\mathbf{s}}$	hmotnost jha statoru (kg)
$m_{\mathbf{p}}$	hmotnost pólů (kg)
$m_{\mathbf{PM}}$	hmotnost permanentních magnetů (kg)
$m_{\mathbf{r}}$	hmotnost plechů rotorového svazku (kg)
$m_{\mathbf{s}}$	hmotnost železa statorového svazku (kg)
$m_{\mathbf{r}}$	hmotnost rozběhového vinutí (kg)
$m_{\mathbf{vs}}$	hmotnost statorového vinutí (kg)
$m_{\mathbf{zs}}$	hmotnost zubů statoru (kg)
$\sum m$	hmotnost budicího vinutí (kg)
$\rho_{\mathbf{Cu}}$	hustota mědi (kg m^{-3})
$\rho_{\mathbf{Fe}}$	hustota použité oceli (kg m^{-3})
$\rho_{\mathbf{PM}}$	hustota materiálu permanentních magnetů (kg m^{-3})
$\rho_{\mathbf{Cu}\vartheta}$	rezistivita mědi při teplotě ϑ (Ωm)
ϑ	pracovní teplota ($^{\circ}\text{C}$)
$R_{\mathbf{b}}$	odpor budicího vinutí (Ω)
$r_{\mathbf{b}}$	odpor budicího vinutí (p.j.)
$R_{\mathbf{s}}$	odpor jedné fáze statorového vinutí (Ω)
$r_{\mathbf{s}}$	odpor jedné fáze statorového vinutí (p.j.)
$r_{\mathbf{td}}$	odpor rozběhového vinutí v podélné ose (p.j.)
$r_{\mathbf{tq}}$	odpor rozběhového vinutí v příčné ose (p.j.)

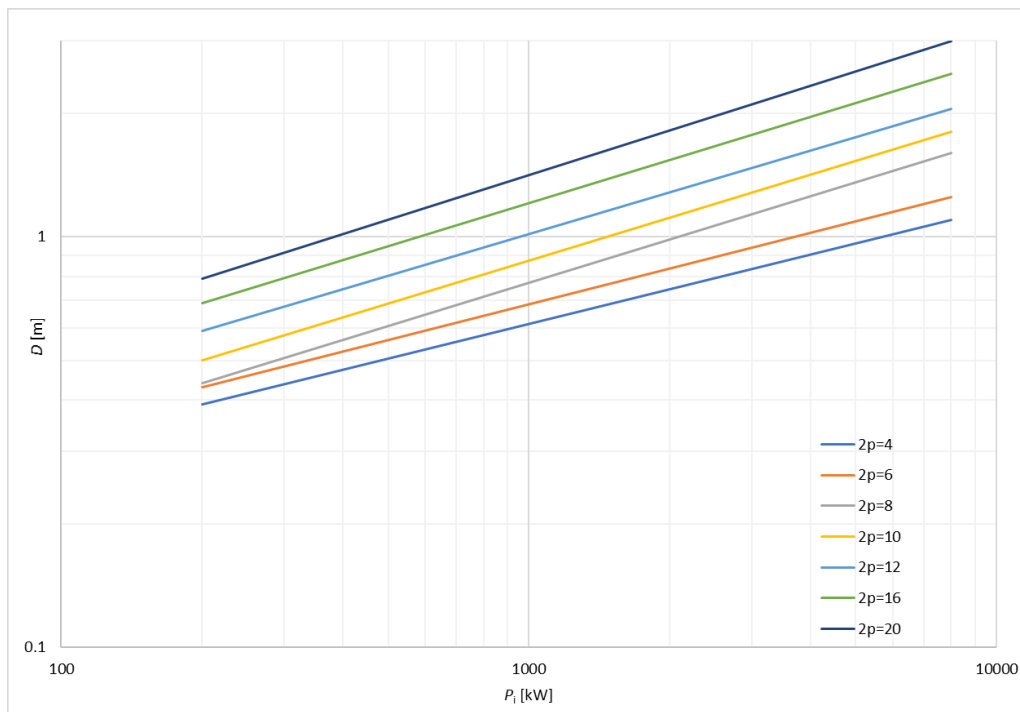
X_{σ}	rozptylová reaktance statorového vinutí (Ω)
x_{σ}	rozptylová reaktance statorového vinutí (p.j.)
$x_{\sigma b}$	rozptylová reaktance budicího vinutí (p.j.)
x_{ad}	reaktance podélné reakce kotvy (p.j.)
x_{aq}	reaktance příčné reakce kotvy (p.j.)
x_b	reaktance budicího vinutí (p.j.)
x_d	podélná synchronní reaktance (p.j.)
x_q	příčná synchronní reaktance (p.j.)
x_{md}	magnetizační reaktance v podélné ose (p.j.)
x_{mq}	magnetizační reaktance v příčné ose (p.j.)
x_{td}	rozptylová reaktance rozběhového vinutí v podélné ose (p.j.)
x_{tq}	rozptylová reaktance rozběhového vinutí v příčné ose (p.j.)
Z_{vz}	vztažná hodnota impedance (Ω)
c_r	korekční faktor rotoru (-)
c_s	korekční faktor statoru (-)
k_{ad}	činitel podélné reakce kotvy (-)
k_{aq}	činitel příčné reakce kotvy (-)
k_B	činitel tvaru pole (-)
k_c	Carterův činitel (-)
K_D	poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru (-)
k_E	poměr napětí indukovaného v kotvě k napětí jmenovitému (-)
k_{Fe}	činitel plnění železa (-)
k_r	činitel rozlohy vinutí (-)
k_t	činitel rozlohy rozběhového vinutí (-)
k_{vs}	činitel vinutí statoru (-)
k_y	činitel zkrácení kroku (-)
σ_p	činitel rozptylu pólů (-)
λ_{σ}	poměrná magnetická vodivost pro rozptylový tok (-)
λ_c	činitel poměrné magnetické vodivosti v čelech vinutí (-)
λ_d	činitel poměrné magnetické vodivosti v drážce (-)
λ_{dif}	činitel poměrné magnetické vodivosti diferenčního rozptylu (-)
λ_{Rd}	činitel magnetické vodivosti segmentu nakrátko v podélné ose (-)
λ_{Rq}	činitel magnetické vodivosti segmentu nakrátko v příčné ose (-)

Seznam příloh

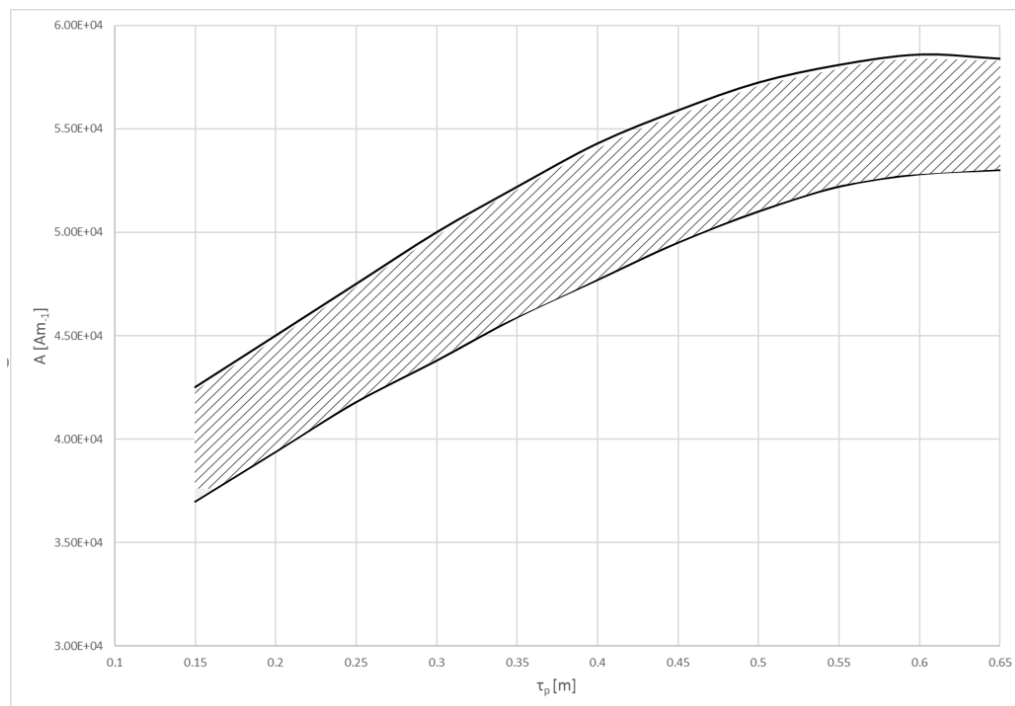
A Použité grafy	56
B Použité tabulky	62
C Porovnání s 1,6 MW motorem	64

A Použité grafy

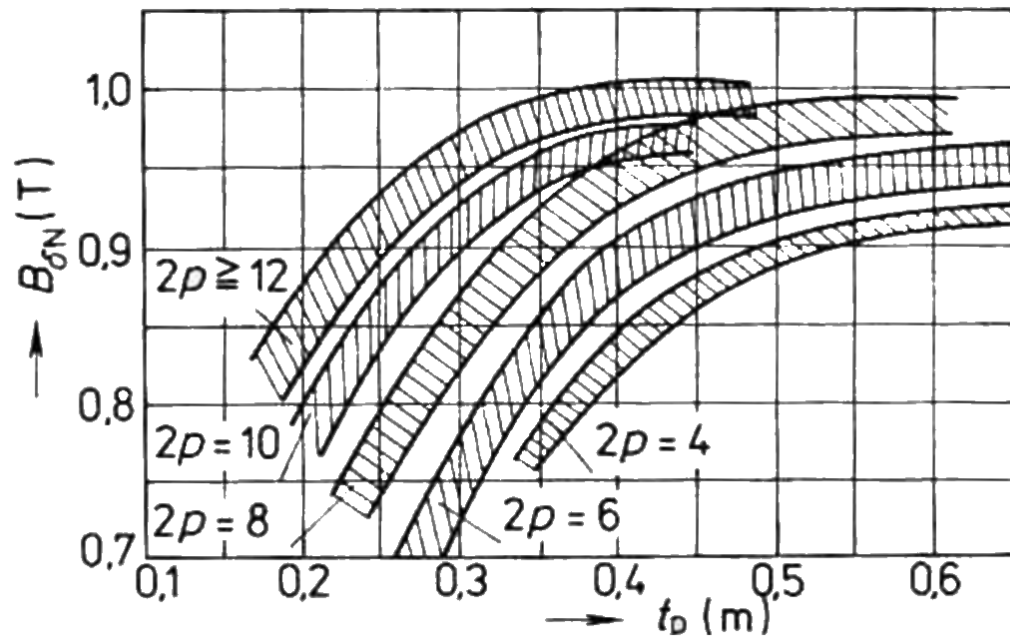
Obr. A.1: Závislost $D_s = f(P_i)$ pro různé počty pólů [7]



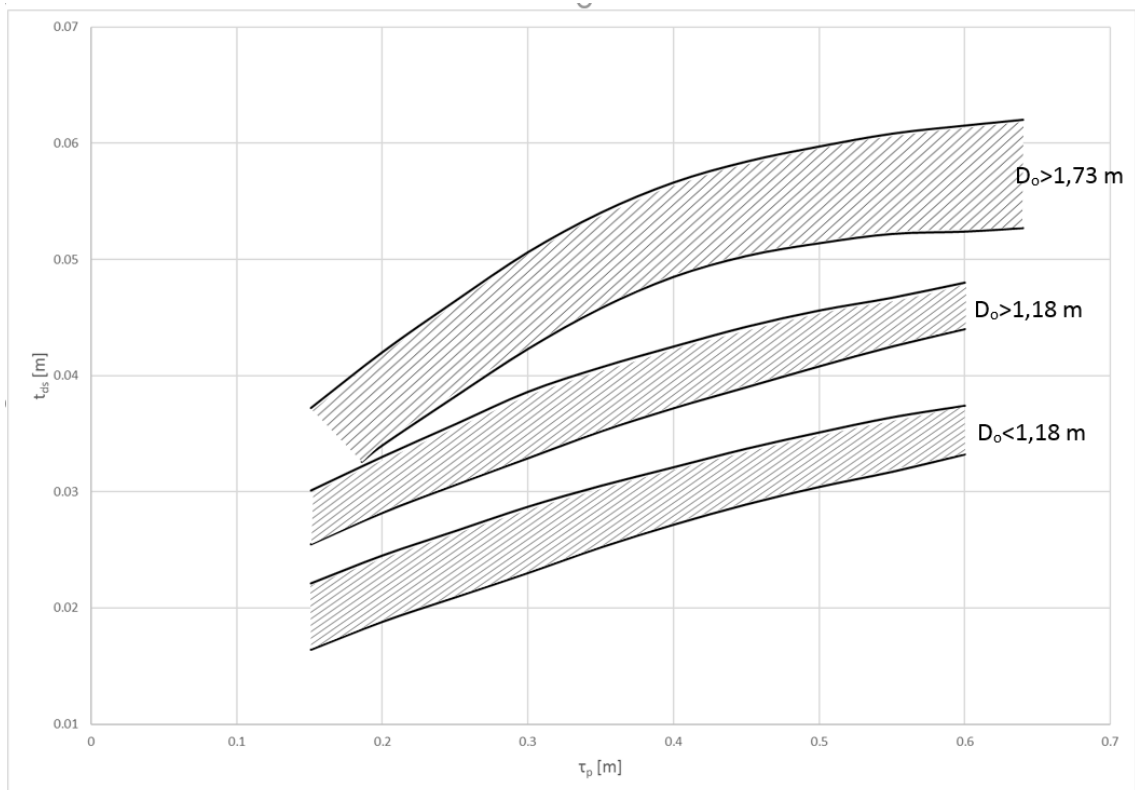
Obr. A.2: Závislost A na pólové rozteči τ_p [7]



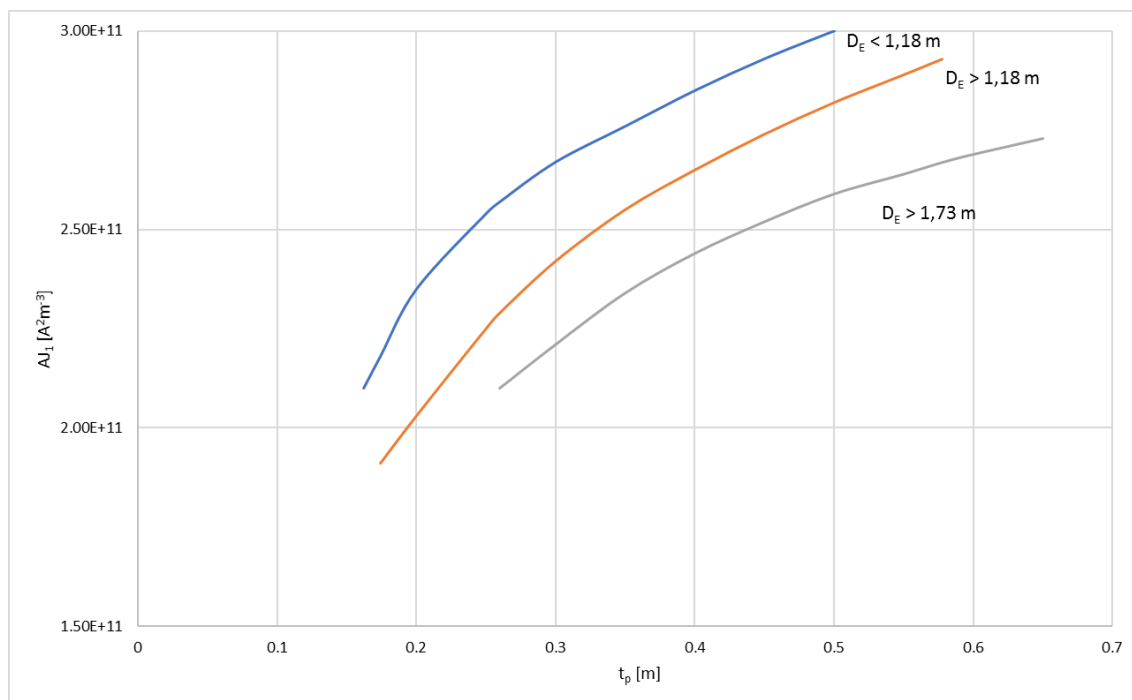
Obr. A.3: Závislost B_δ na pólové rozteči τ_p [7]



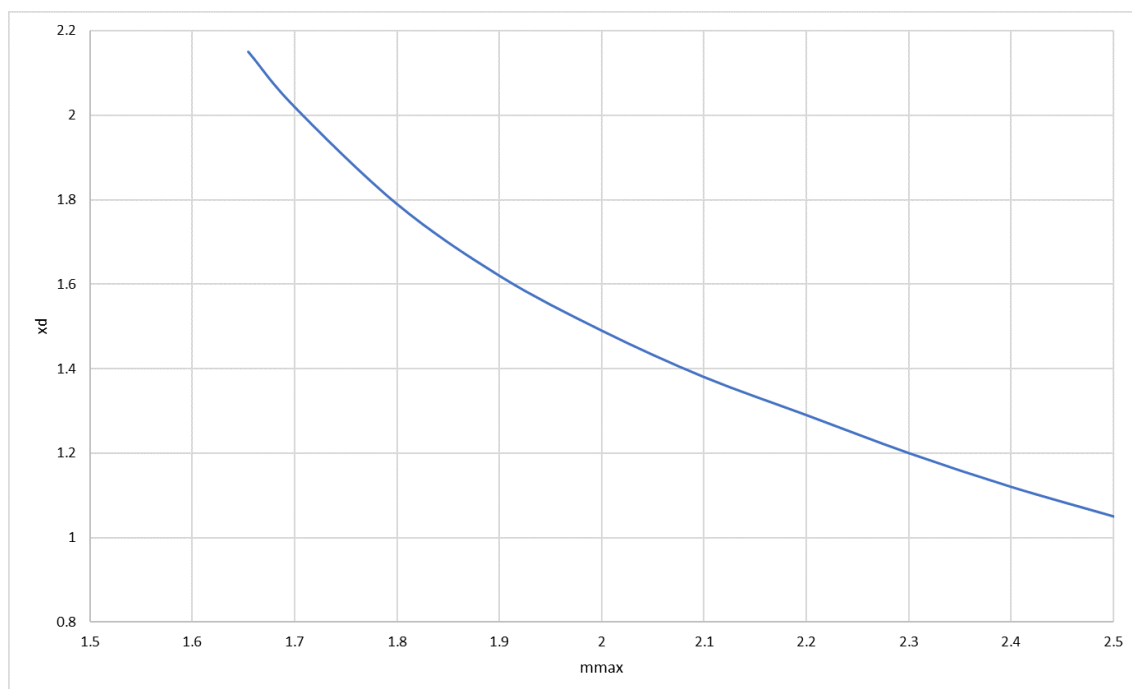
Obr. A.4: Rozmezí drážkové rozteče statoru v závislosti na pólové rozteči [7]



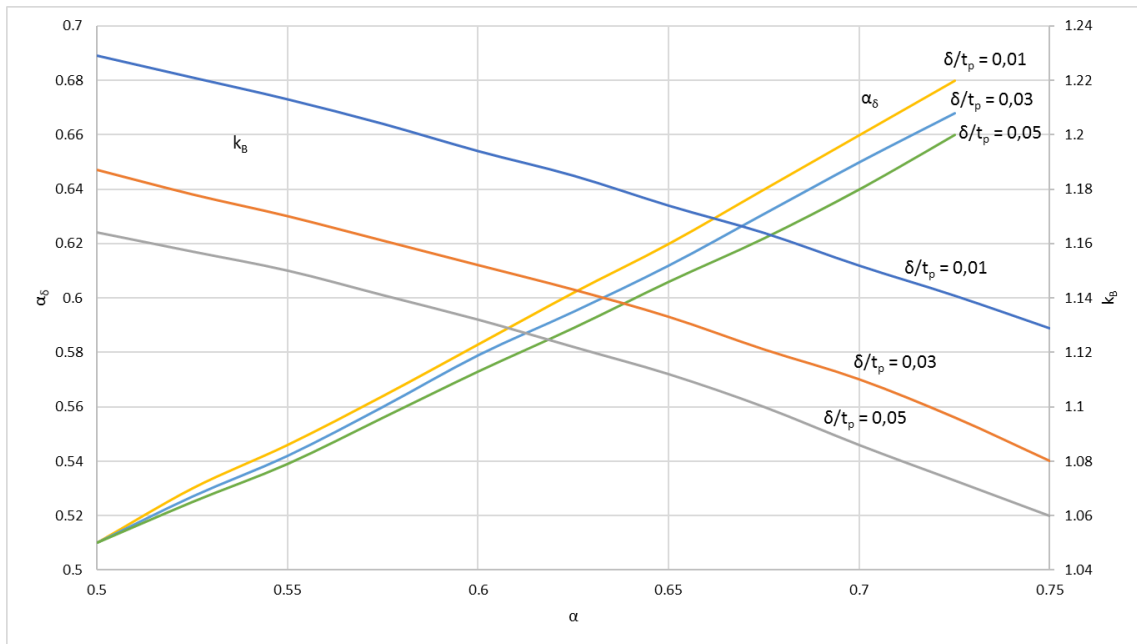
Obr. A.5: Závislost $A\sigma_s$ na pólové rozteči τ_p [7]



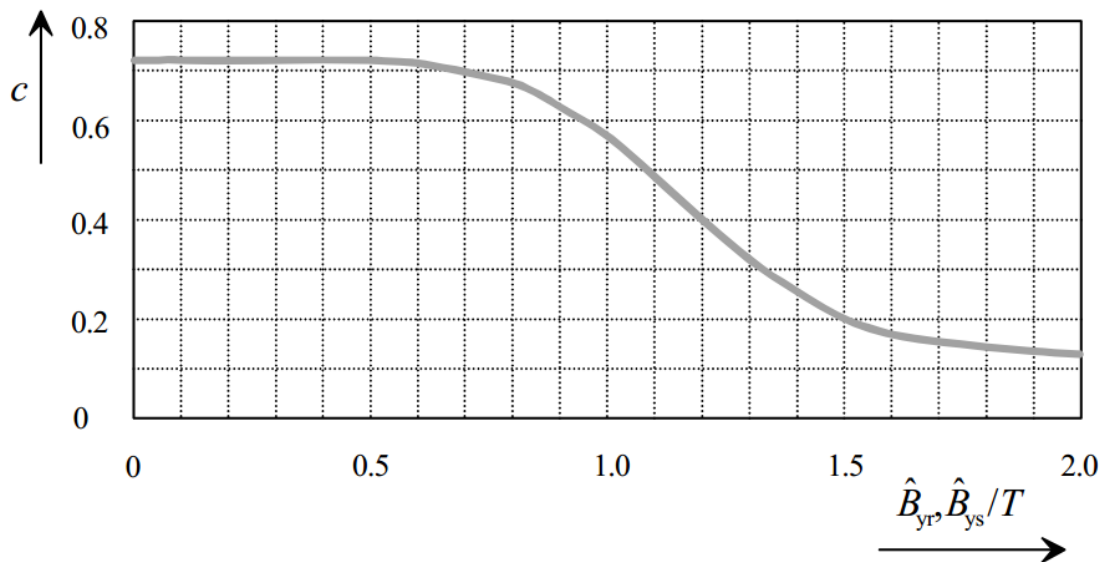
Obr. A.6: Závislost x_d na momentové přetížitelnosti m_{\max} [7]



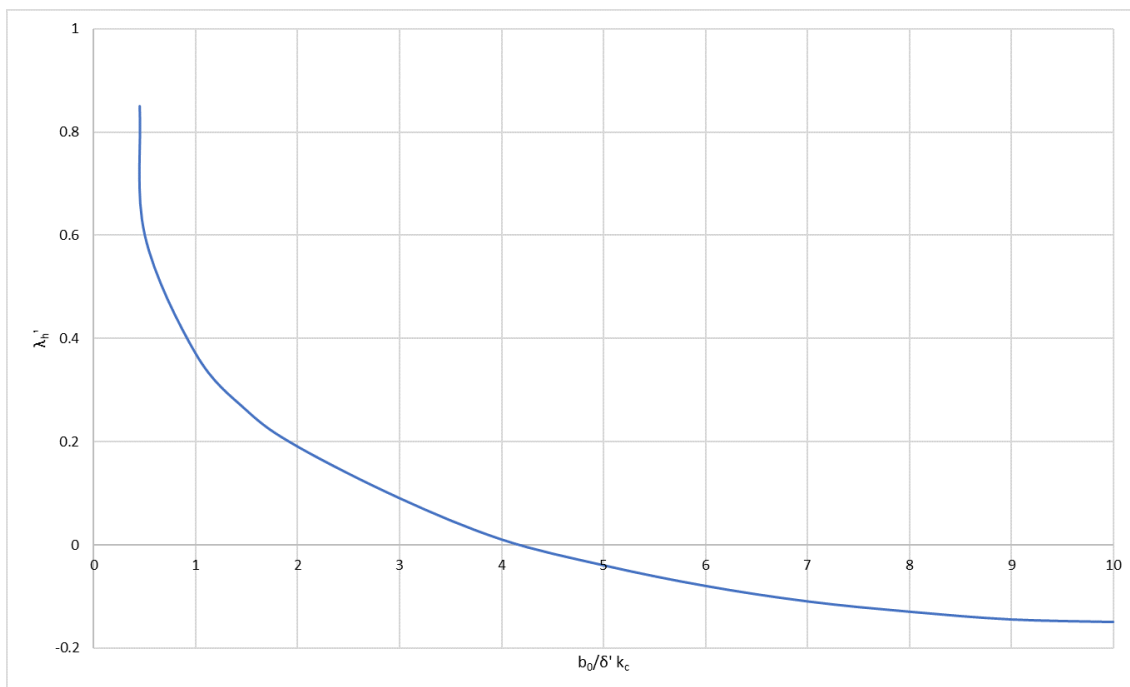
Obr. A.7: Závislost α_δ a k_B na pólovém krytí α [7]



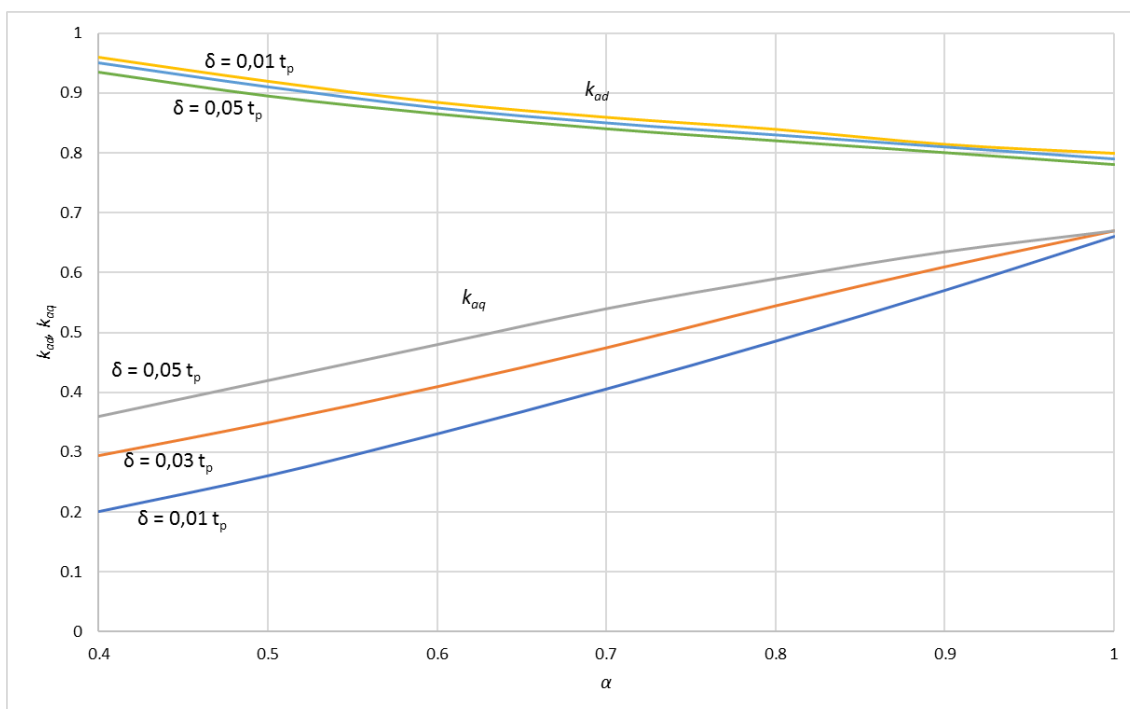
Obr. A.8: Závislost činitele c na magnetické indukci [11]



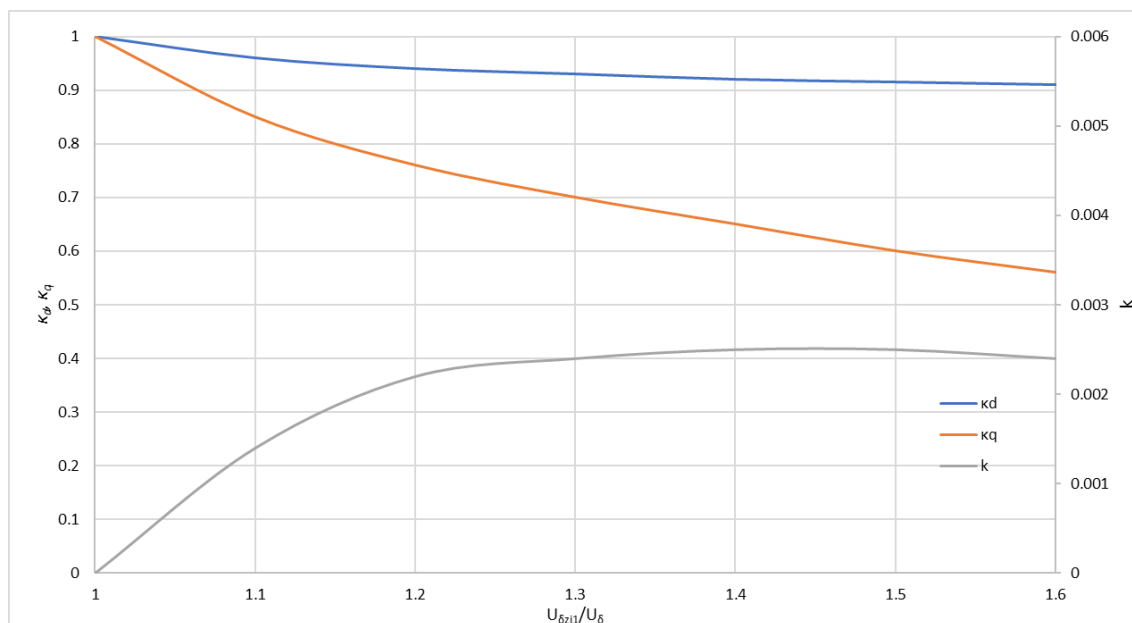
Obr. A.9: Závislost λ'_h na $b_0/\delta'k_c$ [7]



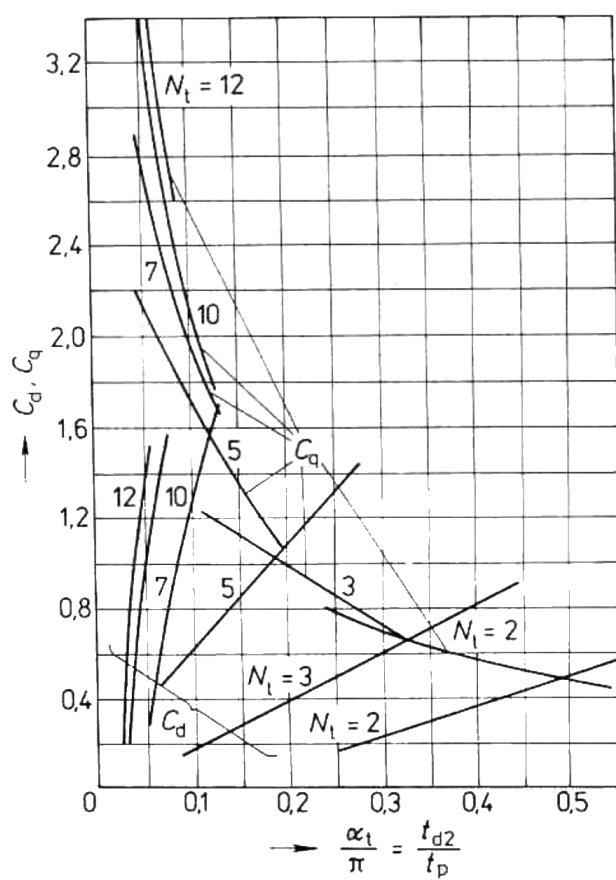
Obr. A.10: Závislost činitelů k_{ad} a k_{aq} na pólovém krytí α [7]



Obr. A.11: Závislost koeficientů κ_d , κ_q a k na $U_{\delta zj1}/U_\delta$ [7]



Obr. A.12: Koeficienty C_d a C_q [7]



B Použité tabulky

Tab. B.1: Rozměry a průřezy měděných vodičů pravoúhlého průřezu

Šířka vodiče <i>b_f</i> [mm]	Výška vodiče <i>h_v</i> [mm]																	
	0.8	0.9	1	1.12	1.25	1.4	1.6	1.8	2	2.24	2.5	2.8	3.15	3.55	4	4.5	5	5.6
2	1.463	1.626	1.785	2.025	2.285	2.585	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.12	1.559	1.734	1.905	2.16	2.435	2.753	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.24	1.655	1.842	2.025	2.294	2.585	2.921	3.369	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.36	1.751	1.95	2.145	2.429	2.735	3.089	3.561	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5	1.863	2.076	2.285	2.585	2.91	3.285	3.785	4.137	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.65	1.983	2.211	2.435	2.753	3.098	3.495	4.025	4.407	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.8	2.103	2.346	2.585	2.921	3.285	3.705	4.265	4.677	5.237	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2.263	2.526	2.785	3.145	3.535	3.985	4.585	5.038	5.638	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.15	2.383	2.661	2.935	3.313	3.723	4.195	4.825	5.307	5.937	6.693	-	-	-	-	-	-	-	-
3.35	2.543	2.841	3.135	3.537	3.973	4.475	5.145	5.667	6.337	7.141	-	-	-	-	-	-	-	-
3.55	2.703	3.021	3.335	3.761	4.223	4.755	5.465	6.027	6.737	7.589	8.326	-	-	-	-	-	-	-
3.75	2.803	3.201	3.535	3.985	4.473	5.035	5.785	6.387	7.137	8.037	8.826	-	-	-	-	-	-	-
4	3.063	3.426	3.785	4.265	4.785	5.385	6.185	6.837	7.637	8.597	9.451	10.65	-	-	-	-	-	-
4.25	3.263	3.651	4.035	4.545	5.098	5.735	6.585	7.287	8.137	9.157	10.08	11.35	-	-	-	-	-	-
4.5	3.463	3.876	4.285	4.825	5.41	6.085	6.985	7.737	8.637	9.717	10.7	12.05	13.63	-	-	-	-	-
4.75	3.663	4.101	4.535	5.105	5.723	6.435	7.385	8.188	9.137	10.28	11.33	12.75	14.41	-	-	-	-	-
5	3.863	4.326	4.785	5.385	6.035	6.785	7.785	8.637	9.637	10.84	11.95	13.45	15.2	17.2	-	-	-	-
5.3	4.103	4.596	5.085	5.721	6.41	7.205	8.265	9.177	10.24	11.51	12.7	14.29	16.15	18.27	-	-	-	-
5.6	4.343	4.866	5.385	6.057	6.785	7.625	8.745	9.717	10.84	12.18	13.45	15.13	17.09	19.33	21.54	-	-	-
6	4.663	5.226	5.785	6.505	7.285	8.185	9.385	10.44	11.64	13.08	14.45	16.25	18.35	20.75	23.14	-	-	-
6.3	4.903	5.496	6.085	6.841	7.66	8.605	9.865	10.98	12.24	13.75	15.2	17.09	19.3	21.82	24.34	27.49	-	-
6.7	-	5.856	6.485	7.289	8.16	9.165	10.51	11.7	13.04	14.65	16.2	18.21	20.56	23.24	25.94	29.29	-	-
7.1	-	6.216	6.885	7.737	8.66	9.725	11.15	12.42	13.84	15.54	17.2	19.33	21.82	24.66	27.54	31.09	34.64	-
7.5	-	-	7.285	8.185	9.16	10.29	11.79	13.14	14.64	16.44	18.2	20.45	23.08	26.08	29.14	32.89	36.64	-
8	-	-	7.785	8.745	9.785	10.99	12.59	14.04	15.64	17.56	19.45	21.85	24.65	27.85	31.14	35.14	39.14	43.94
8.5	-	-	-	9.305	10.41	11.69	13.39	14.94	16.64	18.68	20.7	23.25	26.23	29.63	33.14	37.39	41.64	46.74
9	-	-	-	9.865	11.04	12.39	14.19	15.84	17.64	19.8	21.95	24.65	27.8	31.4	35.14	39.64	44.14	49.54
9.5	-	-	-	-	11.66	16.09	14.99	16.74	18.64	20.92	23.2	26.05	29.38	33.18	37.17	41.89	46.64	52.34
10	-	-	-	-	12.29	13.79	15.79	17.64	19.64	22.04	24.45	27.45	30.95	34.95	39.17	44.14	49.14	55.14
10.6	-	-	-	-	-	14.63	16.75	18.72	20.84	23.38	25.95	29.13	32.84	37.08	41.54	46.84	52.14	58.5
11.2	-	-	-	-	-	15.47	17.71	19.8	22.04	24.73	27.45	30.81	34.73	39.21	43.94	49.54	55.14	61.86
11.8	-	-	-	-	-	-	18.67	20.88	23.24	26.07	28.95	32.49	36.62	41.34	46.14	52.24	58.14	65.22
12.5	-	-	-	-	-	-	19.79	22.14	24.64	27.64	30.7	34.45	38.83	43.83	49.14	55.39	61.64	69.14
14	-	-	-	-	-	-	-	24.84	27.64	31	34.45	38.65	43.55	49.15	55.14	62.14	69.14	77.54
16	-	-	-	-	-	-	-	-	31.64	35.48	39.45	44.25	49.85	56.25	63.14	71.14	79.14	88.74

Tab. B.2: Rozměry a průřezy měděných plochých tyčí se zaoblenými hranami

Šířka [mm]	Tloušťka [mm]															
	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20		
7	33,76	37,26	40,32	43,82	47,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	38,76	42,76	46,32	50,32	54,32	61,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	43,76	48,26	52,32	56,82	61,32	69,8	78,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	48,76	53,76	58,32	63,32	68,32	77,8	87,8	97,8	-	-	-	-	-	-	-	-
11	53,76	59,26	64,32	69,82	75,32	85,8	96,8	107,8	118,8	-	-	-	-	-	-	-
12	58,76	64,76	70,32	76,32	82,32	93,8	105,8	117,8	129,8	141,8	-	-	-	-	-	-
13	63,76	70,26	76,32	82,82	89,32	101,8	114,8	127,8	140,8	153,8	-	-	-	-	-	-
14	68,76	75,76	82,32	89,32	96,32	109,8	123,8	137,8	151,8	165,8	193,8	-	-	-	-	-
15	73,76	81,26	88,32	95,82	103,32	117,8	132,8	147,8	162,8	177,8	207,8	-	-	-	-	-
16	78,76	86,76	94,32	102,32	110,32	125,8	141,8	159,8	173,8	189,8	224,8	252,57	-	-	-	-
18	88,76	97,76	106,32	115,32	124,32	141,8	159,8	177,8	195,8	213,8	249,8	284,57	320,57	-	-	-
20	98,76	108,76	118,32	128,32	138,32	157,8	177,8	197,8	217,8	237,8	277,8	316,57	356,57	-	-	-
22	108,76	119,76	130,32	141,32	152,32	173,8	197,8	217,8	239,8	261,8	305,8	348,57	392,57	-	-	-
25	123,76	136,26	148,32	160,82	173,32	197,8	217,8	247,8	272,8	297,8	347,8	396,57	446,57	-	-	-
28	138,76	152,76	166,32	180,32	194,32	221,8	247,8	277,8	305,8	333,8	389,8	444,57	500,57	-	-	-
30	148,76	163,76	178,32	193,32	208,32	237,8	277,8	297,8	327,8	357,8	417,8	476,57	536,57	-	-	-
32	158,76	174,76	190,32	206,32	222,32	253,8	297,8	317,8	349,8	381,8	445,8	508,57	572,57	-	-	-
35	173,76	191,26	208,32	225,82	243,32	277,8	317,8	347,8	382,8	417,8	487,8	556,57	626,57	-	-	-
40	198,76	218,76	238,32	258,32	278,32	317,8	347,8	397,8	437,8	477,8	557,8	636,57	716,57	796,57	-	-
45	223,76	246,26	268,32	290,82	313,32	347,8	397,8	447,8	492,8	537,8	627,8	716,57	806,57	896,57	-	-
50	248,76	273,76	298,32	323,32	348,32	397,8	447,8	497,8	547,8	597,8	697,8	796,57	896,57	996,57	-	-
55	273,76	301,26	328,32	355,82	383,32	437,8	492,8	547,8	602,8	657,8	767,8	876,57	986,57	1096,57	-	-
60	298,76	328,76	358,32	388,32	418,32	477,8	537,8	597,8	657,8	717,8	837,8	956,57	1076,57	1196,57	-	-
65	323,76	356,26	388,32	420,82	453,32	517,8	582,8	647,8	712,8	777,8	907,8	1036,57	1166,57	1296,57	-	-
70	348,76	383,76	418,32	453,32	488,32	557,8	627,8	697,8	767,8	837,8	977,8	1116,57	1256,57	1396,57	-	-
75	378,76	411,26	448,32	483,82	523,32	597,8	672,8	747,8	822,8	897,8	1047,8	1196,57	1346,57	1496,57	-	-
80	398,76	438,76	478,32	518,32	558,32	637,8	717,8	797,8	877,8	957,8	1117,8	1276,57	1436,57	1596,57	-	-
90	448,76	493,76	538,32	583,32	628,32	717,8	807,8	897,8	987,8	1077,8	1257,8	1436,57	1616,57	1796,57	-	-
100	498,76	548,76	598,32	648,32	698,32	797,8	897,8	997,8	1097,8	1197,8	1397,8	1596,57	1796,57	1996,57	-	-
120	598,76	658,76	718,32	778,32	838,32	957,8	1077,8	1197,8	1317,8	1437,8	1677,8	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-	1497,8	1647,8	1797,8	2097,8	-	-	-	-	-

Tab. B.3: Magnetizační charakteristiky použitých plechů při frekvenci 50 Hz. (Převzato z: <https://cogent-power.com/>)

B [T]	H [A m ⁻¹]		
	M400-50A	M600-50A	M800-50A
0	0	0	0
0,1	32,6	65,6	84,5
0,2	43,5	83,8	107
0,3	50,8	94,1	121
0,4	57,2	103	133
0,5	63,4	110	145
0,6	69,9	118	156
0,7	77,3	127	168
0,8	86,0	136	180
0,9	97,2	147	194
1,0	113	159	209
1,1	137	177	228
1,2	180	205	254
1,3	269	255	304
1,4	516	370	402
1,5	1307	718	660
1,6	3180	1840	1480
1,7	6361	4370	3710
1,8	10890	8330	7300

C Porovnání s 1,6 MW motorem

Stator		Rotor	
Vnější průměr D_o	1230 mm	Vnější průměr D_r	774 mm
Vnitřní průměr D_s	780 mm	Vnitřní průměr D_i	560 mm
Délka paketů l_{pa}	10x80 mm	Vnější průměr jha D_j	754 mm
Délka kanálu b_{vk}	10 mm	Hmotnost jha m_{jr}	1242 kg
Celková délka l	890 mm		
Vzduchová mezera δ	2,0 mm		
Počet drážek Q_s	108	Počet pólů 2p	8
Drážek na pól a fázi q_s	4,5	Pólová rozteč τ_p	306,3 mm
Šířka drážky b_{ds}	11,5 mm	Pólové krytí α	0,785
Výška drážky h_{ds}	89,5 mm	Výška magnetu h_{PM}	10 mm
Hmotnost svazku m_s	3720 kg	Hmotnost magnetů m_{PM}	115,5 kg
Základní parametry		Vinutí	
Výkon P_N	1600 kW	Paralelní větve a	4
Otáčky n	750 min ⁻¹	Vodičů v drážce N_{ef}	26
Napětí U_N	6000 V	Vodičů fáze v sérii N_s	117
Proud I_{Nf}	190 A	Krok vinutí y	1–12
Účinit $\cos \varphi$	>0,8	Činitel vinutí k_{vs}	0,915
Účinnost η	97,5 %	Rozměr vodiče b_v	6,3 mm
Moment M_N	20 380 Nm	Rozměr vodiče h_v	2,24 mm
Maximální moment M_{max}	24 500 Nm	Paralelních tyčí n_s	1
Mechanické ztráty ΔP_{mech}	3 kW	Délka vodiče l_{zs}	1510 mm
Ztráty ve vinutí ΔP_{js}	15,925 kW	Odpor vinutí R_s	0,225 Ω
Ztráty v železe ΔP_{Fe}	10,10 kW	Indukčnost vinutí L_v	75 mH
Dodatečné naprázdno $\Delta P_{\delta p}$	1,06 kW	Synchronní reaktance x_d	23,56 Ω
Dodatečné při zatížení ΔP_d	8 kW	Hmotnost vinutí m_{vs}	530 kg
Celkové ztráty ΔP	38,225 kW	Celková hmotnost $\sum m$	5607,5 kg

Tab. C.1: Dodané parametry 1,6 MW motoru

Stator		Rotor	
Vnější průměr D_o	1430 mm	Vnější průměr D_r	975,4 mm
Vnitřní průměr D_s	980,4 mm	Vnitřní průměr D_i	777,3 mm
Délka paketů l_{pa}	10x43,9 mm	Vnější průměr jha D_j	961,4 mm
Délka kanálu b_{vk}	10 mm	Hmotnost jha m_{jr}	825 kg
Celková délka l	529 mm		
Vzduchová mezera δ	2,5 mm		
Počet drážek Q_s	84	Počet pólů 2p	8
Drážek na pól a fázi q_s	3,5	Pólová rozteč τ_p	385 mm
Šířka drážky b_{ds}	14,82 mm	Pólové krytí α	0,8
Výška drážky h_{ds}	90,34 mm	Výška magnetu h_{PM}	7 mm
Hmotnost svazku m_s	2422 kg	Hmotnost magnetů m_{PM}	50 kg
Základní parametry		Vinutí	
Výkon P_N	1600 kW	Paralelní větve a	4
Otáčky n	750 min ⁻¹	Vodičů v drážce N_{ef}	42
Napětí U_N	6000 V	Vodičů fáze v sérii N_s	147
Proud I_{Nf}	178,2 A	Krok vinutí y	9
Účinit $\cos \varphi$	0,886	Činitel vinutí k_{vs}	0,93
Účinnost η	97,55 %	Rozměr vodiče b_v	10,6 mm
Moment M_N	20 372 Nm	Rozměr vodiče h_v	1,4 mm
Maximální moment M_{max}	33 399 Nm	Paralelních tyčí n_s	1
Mechanické ztráty ΔP_{mech}	9,4 kW	Délka vodiče l_{zs}	2336 mm
Ztráty ve vinutí ΔP_{js}	12,66 kW	Odpor vinutí R_s	0,133 Ω
Ztráty v železe ΔP_{Fe}	6,75 kW	Synchronní reaktance x_d	14,66 Ω
Dodatečné naprázdno $\Delta P_{\delta p}$	3,34 kW	Synchronní reaktance x_q	10,48 Ω
Dodatečné při zatížení ΔP_d	8 kW	Hmotnost vinutí m_{vs}	536 kg
Celkové ztráty ΔP	40,2 kW	Celková hmotnost $\sum m$	3834 kg

Tab. C.2: Parametry motoru navrženého programem